

Cari

Cari



Aktif Belajar Fisika XII

SMA & MA



Aktif Belajar

Fisika

Untuk SMA & MA

Kelas

XII



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Cari

Aktif Belajar

Fisika

Untuk SMA & MA

Kelas

XII



PUSAT PERBUKUAN
Departemen Pendidikan Nasional

Hak Cipta Pada Departemen Pendidikan Nasional
Dilindungi oleh Undang-Undang

Aktif Belajar

Fisika XII

Untuk SMA & MA

Editor Ahli:

Suparmi

Editor:

Indah Nugrahaningsih

Setting/Lay Out:

Tutik Supriyanti

Perwajahan:

Wahyudin Miftakhul Anwar

Ilustrator:

Adi Wahyono

530.07

CAR

CARI

a

Aktif Belajar Fisika : untuk SMA & MA Kelas XII / penulis, Cari
; editor, Suparmi ; ilustrator, Adi Wahyono. — Jakarta :
Pusat Perbukuan, Departemen Pendidikan Nasional, 2009.
vi, 386 hlm. : illus. ; 25 cm

Bibliografi : hlm. 379

Indeks

ISBN 978-979-068-798-1 (no jilid lengkap)

ISBN 978-979-068-801-8

1. Fisika-Studi dan Pengajaran I. Judul
II. Suparmi III. Adi Wahyono

Diterbitkan oleh Pusat Perbukuan
Departemen Pendidikan Nasional Tahun 2009

Hak Cipta Buku ini dibeli oleh Departemen Pendidikan Nasional
dari Penerbit : CV. Mediatama

Diperbanyak oleh : ...

Kata Sambutan

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Allah SWT, berkat rahmat dan karunia-Nya, Pemerintah, dalam hal ini, Departemen Pendidikan Nasional, pada tahun 2009, telah membeli hak cipta buku teks pelajaran ini dari penulis/penerbit untuk disebarluaskan kepada masyarakat melalui situs internet (*website*) Jaringan Pendidikan Nasional.

Buku teks pelajaran ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan dan telah ditetapkan sebagai buku teks pelajaran yang memenuhi syarat kelayakan untuk digunakan dalam proses pembelajaran melalui Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Nomor 9 Tahun 2009 tanggal 12 Februari 2009.

Kami menyampaikan penghargaan yang setinggi-tingginya kepada para penulis/penerbit yang telah berkenan mengalihkan hak cipta karyanya kepada Departemen Pendidikan Nasional untuk digunakan secara luas oleh para siswa dan guru di seluruh Indonesia.

Buku-buku teks pelajaran yang telah dialihkan hak ciptanya kepada Departemen Pendidikan Nasional ini, dapat diunduh (*down load*), digandakan, dicetak, dialihmediakan, atau difotokopi oleh masyarakat. Namun, untuk penggandaan yang bersifat komersial harga penjualannya harus memenuhi ketentuan yang ditetapkan oleh Pemerintah. Diharapkan bahwa buku teks pelajaran ini akan lebih mudah diakses sehingga siswa dan guru di seluruh Indonesia maupun sekolah Indonesia yang berada di luar negeri dapat memanfaatkan sumber belajar ini.

Kami berharap, semua pihak dapat mendukung kebijakan ini. Kepada para siswa kami ucapkan selamat belajar dan manfaatkanlah buku ini sebaik-baiknya. Kami menyadari bahwa buku ini masih perlu ditingkatkan mutunya. Oleh karena itu, saran dan kritik sangat kami harapkan.

Jakarta, Juni 2009
Kepala Pusat Perbukuan

Kata Pengantar

Buku ini diperuntukkan bagi kalian, siswa SMA/MA agar dapat memahami gejala-gejala fisika. Fisika yang mempelajari gejala-gejala alam selalu berkembang sejalan dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi. Materi fisika disajikan dalam bentuk dialog tentang gejala-gejala fisika, sehingga mendorong kalian untuk melakukan tugas yang mencakup penemuan, dan penyelesaian yang dipesankan dari dialog. Belajar fisika dengan metode ini diharapkan mempermudah memahami konsep fisika dan menghapuskannya dalam kehidupan sehari-hari.

Tujuan utama buku ini adalah agar kalian mengembangkan penalaran melalui situasi yang menantang, dari prinsip yang mendasar menuju ke penyelesaian situasi. Penyelesaian contoh soal disajikan tahap demi tahap, dimulai dari ide utama sampai diperoleh jawaban.

Dalam bab terdapat **kalimat pembuka** yang dapat memotivasi kalian untuk mempelajari materi selanjutnya. **Kegiatan siswa**, sebagai pengantar penemuan konsep atau pembuktian konsep yang ada. **Kisi**, merupakan *fitur* yang menyajikan tentang gejala-gejala, penemuan konsep/teknologi dan ilmuwan fisika. **Kreasi fisika**, merupakan *fitur* yang “menghasilkan” sesuatu berdasar hukum fisika. **Brilian** menghantarkan kalian membuktikan hukum-hukum fisika yang ada dan memotivasi kalian untuk menerapkan hukum-hukum tersebut. **Gambar ilustrasi** yang memudahkan kalian mempelajari konsep-konsep fisika. Pada akhir bab terdapat uji kompetensi untuk melatih kemampuan akademik dan personal kalian.

Ucapan terima kasih yang sebesar-sebesarnya ditujukan kepada semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian buku ini. Kepada guru-guru fisika, senantiasalah menyampaikan materi dengan melibatkan siswa secara aktif.

Kritik dan saran sangat kami nantikan dalam upaya perbaikan buku ini pada edisi mendatang.

Surakarta, Mei 2007

Penulis

Daftar Isi

Katalog Dalam Terbitan (KDT)	ii
Kata Sambutan	iii
Kata Pengantar	iv
Daftar Isi	v
Bab I Gelombang	1
A. Rambat Gelombang dalam Satu Dimensi.....	5
B. Pemantulan dan Transmisi Gelombang	8
C. Gelombang Harmonik	10
D. Transmisi Energi Gelombang pada Tali	12
E. Interferensi Gelombang.....	14
F. Gelombang Berdiri.....	17
Uji Kompetensi	28
Bab II Gelombang Bunyi	33
A. Cepat Rambat Gelombang Bunyi	35
B. Gelombang Bunyi dalam Gas	35
C. Cepat Rambat Bunyi pada Batang	37
D. Gelombang Harmonik Bunyi.....	40
E. Energi dan Intensitas Gelombang Bunyi	44
F. Taraf Intensitas Bunyi (<i>Sound Level</i>)	47
G. Efek Doppler	50
H. Pipa Organa	53
I. Pelayangan Gelombang	58
J. Resonansi Bunyi.....	60
K. Fenomena Bunyi	60
Uji Kompetensi	66
Bab III Optik Geometri	71
A. Sinar dan Muka Gelombang	72
B. Pemantulan dan Pembiasan	73
C. Penurunan Hukum Snellius.....	77
D. Dispersi	78
E. Pemantulan Total	81
F. Cermin dan Lensa	83
G. Pembiasan pada Prisma.....	105
Uji Kompetensi	108

Bab IV Cahaya sebagai Gelombang	113
A. Interferensi pada Celah Ganda (Percobaan Young)	114
B. Interferensi pada Lapisan Tipis	118
C. Difraksi	120
D. Polarisasi	128
Uji Kompetensi	135
Bab V Listrik Statis	139
A. Pemuatan Listrik Statis	143
B. Gaya Listrik	148
C. Medan Listrik	153
D. Potensial Listrik, Energi dan Kapasitansi Listrik	173
E. Kapasitansi dan Dielektrik	184
Uji Kompetensi	196
Bab VI Medan Magnet	201
A. Gaya Magnetik	204
B. Torsi pada Loop Berarus dalam Medan Magnet	213
C. Sumber-sumber Elektromagnetik	216
D. Fluks Magnet	224
E. Hukum Gauss untuk Medan Magnet	227
F. Generalisasi Hukum Ampere	227
G. Magnetisme dalam Materi	228
Uji Kompetensi	235
Bab VII Induksi Elektromagnetik	239
A. Hukum Faraday	241
B. GGL Induksi dan Medan Listrik	244
C. Aplikasi Induksi Elektromagnetik	244
D. Persamaan Maxwell	247
E. Induktansi	248
F. Rangkaian Arus Bolak-balik	259
G. Transformator dan Transmisi Daya	269
Uji Kompetensi	273
Latihan Ulangan Semester I	277

Bab VIII	Radiasi Benda Hitam	283
	A. Pergeseran Wien	284
	B. Bencana Ultraviolet dan Hipotesa Planck	288
	C. Efek Fotolistrik	289
	D. Efek Compton	293
	Uji Kompetensi	296
Bab IX	Teori Atom	299
	A. Atom Menurut Demokritus	300
	B. Teori Atom Dalton	300
	C. Teori Atom Thompson	300
	D. Model Atom Rutherford	301
	E. Teori Bohr	302
	F. Tingkat-tingkat Energi	307
	G. Hipotesa de Broglie	309
	H. Atom dengan Banyak Elektron	314
	Uji Kompetensi	318
Bab X	Relativitas Khusus	321
	A. Relativitas Newton	322
	B. Eksperimen Michelson dan Morley (M-M)	324
	C. Transformasi Lorentz	326
	D. Hubungan antara Massa, Momentum dan Energi Relativistik	332
	Uji Kompetensi	340
Bab XI	Inti Atom dan Radioaktivitas	343
	A. Struktur dan Gaya Inti	344
	B. Radioaktivitas	348
	C. Energi Ikat Inti	356
	D. Reaksi Inti	359
	E. Radiasi Bagi Kesehatan	363
	Uji Kompetensi	369
	Latihan Ulangan Semester II	372
	Glosarium	378
	Daftar Pustaka	379
	Indeks	380
	Lampiran	383
	Kunci	385

Bab I

Gelombang

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang secara umum.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Frekuensi
2. Amplitudo
3. Kecepatan rambat gelombang
4. Panjang gelombang

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

1. Persamaan gelombang mekanik
2. Pemantulan dan transmisi gelombang
3. Energi gelombang
4. Interferensi gelombang
5. Gelombang berdiri

Kalian pernah pergi ke sungai, danau, pantai, atau kolam renang, bukan? Apakah kalian secara tak sengaja pernah mengamati batu atau buah-buahan jatuh ke air? Kalian melihat gelombang air yang bergerak merambat ke luar dan tempat batu jatuh tadi seolah-olah merupakan pusat gelombangnya, bukan? Kalian juga sering mendengar istilah gelombang radio, FM dan AM

bukan? Kira-kira apakah perbedaan dan persamaan antara gelombang air dan gelombang radio? Kalian bisa melihat atau mengamati secara langsung gelombang air tetapi tidak bisa mengamati secara langsung gelombang radio, bukan?

Gelombang air dan gelombang radio hanya salah satu contoh gejala fisis yang mempunyai karakteristik gelombang. Dunia kita penuh dengan gelombang: gelombang mekanik, seperti gelombang tali, gelombang gempa, gelombang bunyi, gelombang air, gelombang kejut yang dihasilkan oleh pesawat supersonik; gelombang elektromagnetik, seperti gelombang cahaya, sinyal TV, gelombang radio, gelombang mikro, sinar-X dan gelombang materi seperti elektron, proton atau partikel-partikel fundamental. Untuk yang terakhir ini mungkin kalian ada yang pernah mendengar adanya mikroskop elektron, padahal biasanya mikroskop menggunakan cahaya. Ini berarti elektron dipandang sebagai gelombang.

Dalam bab ini hanya akan ditinjau gelombang mekanik, yaitu gelombang yang perambatannya memerlukan medium. Konsep gelombang agak sedikit abstrak. Kalian dapat mengamati gelombang pada permukaan air yang disebut gelombang air. Gelombang tersebut bisa terjadi jika batu terjatuh pada air tersebut. Untuk gelombang pada tali, tidak ada gelombang jika tidak ada tali. Dari contoh-contoh tersebut, pengertian atau interpretasi gelombang terkait dengan gangguan pada benda atau medium. Maka bila kita meninjau gelombang, berarti kita meninjau gerak sebuah usikan. Gerak dari usikan (gerak gelombang itu sendiri) tidak sama dengan gerak partikel. Karena gelombang bersifat abstrak, gelombang biasanya dideskripsikan dengan persamaan matematik yang sama untuk semua jenis gelombang, yaitu gelombang mekanik dan gelombang elektromagnetik. Gerak gelombang mekanik dideskripsikan dengan menspesifikasikan posisi semua titik pada medium yang terganggu sebagai fungsi waktu.

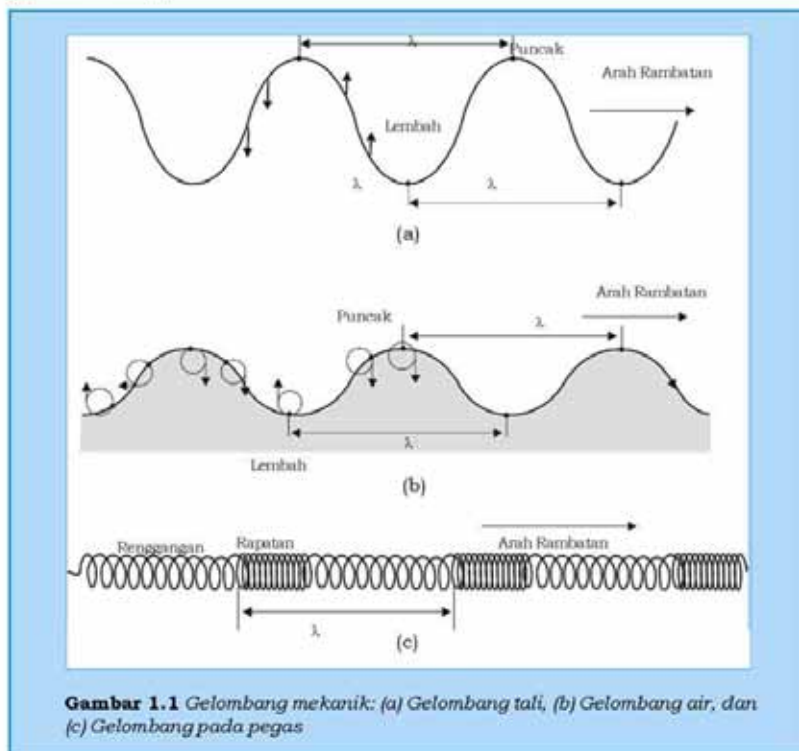
Gelombang mekanik adalah gelombang yang terbentuk dengan syarat adanya:

1. beberapa sumber usikan,
2. medium yang dapat diusik,
3. beberapa hubungan fisis atau mekanisme, yang mana bagian medium yang berdekatan saling berpengaruh.

Kita juga akan menemukan bahwa semua gelombang membawa energi. Sejumlah energi ditransmisikan melalui medium dan cara perpindahan energi akan berbeda, tergantung pada jenis gelombangnya. Misalnya, energi yang dihasilkan oleh gelombang laut pada

saat terjadi badai jauh lebih besar daripada energi gelombang bunyi yang ditimbulkan oleh suara seseorang.

Karakteristik gelombang ditandai dengan **panjang gelombang**, **frekuensi** dan **kecepatan gelombang**. Satu panjang gelombang (λ) pada gelombang tali atau gelombang air, satu gelombang adalah jarak antara dua puncak atau lembah yang terdekat, lihat gambar 1.1(a-b). Sedang pada gelombang pegas, satu panjang gelombang terdiri dari jarak satu rapatan dan jarak satu renggangan, lihat gambar 1.1(c).



Gambar 1.1 Gelombang mekanik: (a) Gelombang tali, (b) Gelombang air, dan (c) Gelombang pada pegas

Sebagian besar gelombang melakukan gerak periodik secara alami. **Frekuensi (f)** dari gelombang periodik adalah jumlah gerak usikan yang terulang persatuan waktu. Gelombang mekanik merambat melalui medium ditentukan oleh faktor **kecepatan**. **Kecepatan gelombang (v)** dalam medium tergantung pada jenis medium yang digunakan untuk merambat. Contoh: gelombang bunyi

yang merambat di udara pada suhu 20°C mempunyai kelajuan 344 m/s, sedangkan kelajuan gelombang bunyi yang merambat dalam benda padat lebih besar daripada kelajuan gelombang bunyi di udara.

Pada gambar 1.1(a), menunjukkan bentuk gelombang yang merambat pada medium tali yang mana gangguan atau simpangan tegak lurus terhadap arah rambatan. Gelombang ini disebut gelombang transversal. Contoh gelombang transversal lainnya adalah gelombang pada permukaan air yang dangkal seperti pada tangki riak, lihat gambar 1.2. Sebaliknya, gelombang pegas adalah jenis gelombang longitudinal yang didefinisikan sebagai gelombang yang gerak usikannya searah dengan arah rambatan, lihat gambar 1.1(c). Pada gelombang longitudinal nampak terjadinya bentuk renggangan dan rapatan secara periodik. Contoh lain gelombang longitudinal adalah gelombang bunyi yang terjadi karena adanya perbedaan tekanan tinggi-rendah secara bergantian yang merambat melalui medium udara.

Gelombang permukaan air merupakan contoh gelombang kombinasi, yaitu gelombang longitudinal dan transversal. Ketika sebuah gelombang air menjalar pada permukaan air yang dalam, molekul-molekul air di permukaan bergerak dalam lintasan mendekati bentuk lingkaran, gambar 1.1(b), sedangkan di permukaannya nampak terjadinya puncak dan lembah secara berurutan. Usikan yang terjadi mempunyai dua komponen, yaitu komponen longitudinal dan transversal. Pada gelombang yang lewat, molekul air di puncak bergerak dalam arah gelombang dan molekul di lembah bergerak berlawanan arah. Sehingga tidak ada resultan perpindahan molekul air setelah melewati satu panjang gelombang penuh.



Gambar 1.2 Gelombang air pada tangki riak

Hubungan antara kecepatan gelombang, panjang gelombang dan frekuensi gelombang dapat diformulasikan secara matematis,

$$v = \lambda f \quad (1.1)$$

Waktu yang diperlukan puncak gelombang untuk merambat sejauh satu panjang gelombang didefinisikan sebagai satu periode, maka

$$v = \lambda / T \quad (1.2)$$

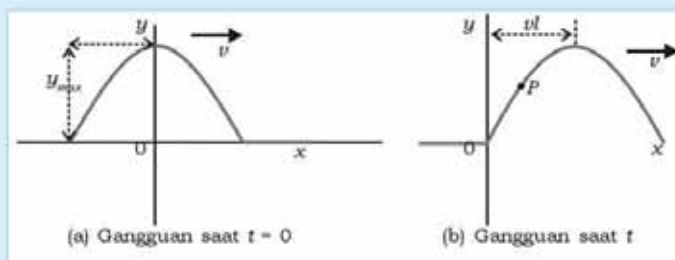
Sehingga diperoleh

$$T = 1/f \quad (1.3)$$

Di mana v adalah kecepatan rambat gelombang, dalam SI dinyatakan dalam m/s, λ adalah panjang gelombang dengan satuan m, T adalah periode dengan satuan sekon dan frekuensi (f) dinyatakan dalam satuan Hz.

A. Rambatan Gelombang dalam Satu Dimensi

Pada diskusi di atas, telah dapat menunjukkan besarnya cepat rambat gelombang pada dawai dari kegiatan yang dilakukan di laboratorium dan dengan menjabarkannya secara matematik. Untuk mendapatkan bentuk persamaan gerak gelombang yang mudah dimengerti kita akan menggunakan analisa gerak satu dimensi. Gambar 1.3 menunjukkan jenis rambatan dari satu gangguan pada tali yang merambat ke arah kanan dalam waktu t . Pulsa tersebut diperoleh bila pada ujung tali yang bebas disentak naik dan turun. Pada saat ujung tali disentak naik, titik-titik tali yang berdekatan dengan ujung yang disentak ke atas ikut naik, kemudian titik-titik yang berdekatan berikutnya ikut naik dan pada saat tali ditarik ke bawah maka titik-titik yang berdekatan secara beruntun juga ikut turun, sehingga terbentuklah sebuah pulsa yang bergerak pada tali.



Gambar 1.3 Rambatan gangguan atau pulsa ke arah kanan

Bila kita menyimpangkan ujung tali secara periodik sebagai simpangan gerak harmonik sederhana, maka kita akan mendapatkan gelombang harmonik yang merambat secara kontinu pada tali dengan kecepatan v . Karena gelombang merambat dalam arah sumbu x dan arah gangguan atau simpangan pada arah sumbu

y , maka harus dicari hubungan antara simpangan dan arah rambatan pada waktu tertentu. Secara matematis, hubungan dapat dituliskan dalam bentuk, $y = f(x, t)$. Di mana y adalah simpangan sesaat elemen gelombang dan x adalah posisi sesaat elemen gelombang sepanjang rambatannya. Simpangan maksimum gelombang disebut amplitudo gelombang. Secara umum fungsi gelombang tersebut dapat dituliskan sebagai,

$$y = f(x - vt) \text{ (arah rambatan gelombang ke kanan)} \quad (1.4)$$

Jika arah rambatan gelombang ke kiri, maka persamaan simpangannya,

$$y = f(x + vt) \text{ (arah rambatan ke kiri)} \quad (1.5)$$

Persamaan 1.4 dan 1.5 menunjukkan perpindahan (simpangan) y karena adanya gangguan dari luar dan disebut sebagai fungsi gelombang yang tergantung pada besaran x dan t , dan dapat ditulis sebagai $f(x, t)$ yang dapat dibaca sebagai fungsi x dan t .

Perhatikan titik partikel di P pada gelombang tali (lihat gambar 1.3(b) yang koordinat posisi dan waktunya sudah tertentu. Jika gelombang lewat titik P, koordinat y pada titik ini akan bertambah hingga mencapai y maksimum dan kemudian turun sampai y sama dengan nol. Oleh karena itu, fungsi gelombang y menggambarkan koordinat y pada sembarang titik P di setiap waktu.

Untuk pulsa yang merambat tanpa mengalami perubahan bentuk, kecepatan gelombang pulsa sama dengan kecepatan gerak puncak gelombang atau kecepatan gerak titik-titik lain pada pulsa. Kecepatan gerak pulsa gelombang, v , dapat dihitung dengan mengukur berapa jauh puncak tersebut telah bergerak, (Δs) dan waktu (Δt) yang diperlukan untuk menempuh jarak tersebut, maka

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

Puncak pulsa adalah titik di mana y mencapai nilai maksimum. Perhatikan pada gambar 1.3, puncak pulsa bergerak ke kanan, pada saat $t = 0$ puncak pulsa berada di titik $x = x_0$ dan dalam waktu Δt , puncak berada pada posisi $x = x_0 + v \Delta t$. Oleh karena itu, dalam waktu Δt , puncak pulsa bergerak sepanjang $\Delta x = (x_0 + v \Delta t) - x_0 = v \Delta t$. Maka secara umum dapat dikatakan bahwa kelajuan gelombang yang disebut kecepatan fase adalah,

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1.6)$$

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 1.1

Penjalaran sebuah pulsa ke arah kanan sepanjang sumbu x ditunjukkan oleh fungsi gelombang,

$$y(x,t) = \frac{2}{(x-2t)^2 + 1}$$

di mana x dan y diukur dalam cm dan t dalam sekon. Bagaimanakah kita membuat sketsa dari grafik pergerakan pulsa atau muka gelombang untuk $t = 0$ s, 1 s, 2 s dan 3 s?

Penyelesaian:

Perhatikan bahwa fungsi gelombang seperti pada contoh soal 1.1 adalah bentuk dari persamaan 1.1. Jika ditelusur lebih lanjut, maka kelajuan gelombang $v = 2$ cm/s dan amplitudonya adalah $y_{\max} = 2$ cm.

Untuk $t = 0$

$$y(x,0) = \frac{2}{x^2 + 1}$$

Untuk $t = 2$ s

$$y(x,2) = \frac{2}{(x-4)^2 + 1}$$

Untuk $t = 1$ s

$$y(x,1) = \frac{2}{(x-2)^2 + 1}$$

Untuk $t = 3$ s

$$y(x,3) = \frac{2}{(x-6)^2 + 1}$$

Untuk mendapatkan harga nyata kalian bisa memasukkan harga x , misalkan untuk harga $t = 0$, $x = 1$ cm,

$$y(1,0) = \frac{2}{1+1} = 1,0 \text{ cm}$$

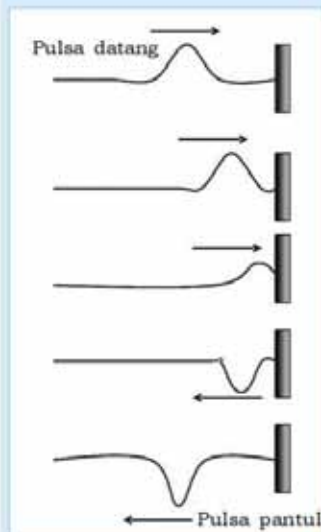
$$y(2,0) = \frac{2}{4+1} = 0,40 \text{ cm}$$

B. Pemantulan dan Transmisi Gelombang

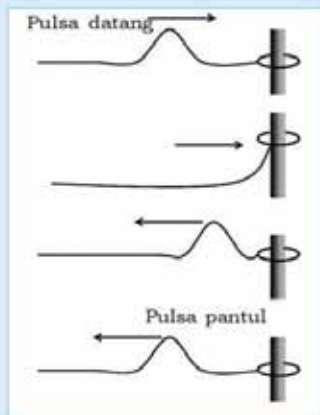
Apabila gelombang yang merambat pada tali mencapai titik di ujung tali yang terikat, maka sebagian gelombang akan dipantulkan, lihat gambar 1.4. Pada gambar 1.4 di tunjukkan pemantulan gelombang merambat pada ujung tali yang terikat secara tetap. Karena tali yang terikat kuat pada dinding, maka pulsa gelombang yang transmisikan ke dinding dianggap kecil.

Kalian perhatikan bahwa pulsa pantul mempunyai bentuk yang terbalik. Hal ini bisa dijelaskan sebagai berikut: ketika pulsa sampai di titik perbatasan atau di ujung tali, tali menghasilkan gaya arah ke atas, akibat hukum III Newton, maka tali mendapat gaya reaksi dari dinding yang arahnya berlawanan yaitu ke bawah. Gaya arah ke bawah ini yang menyebabkan pulsa yang dipantulkan mempunyai bentuk kebalikan dengan pulsa datang.

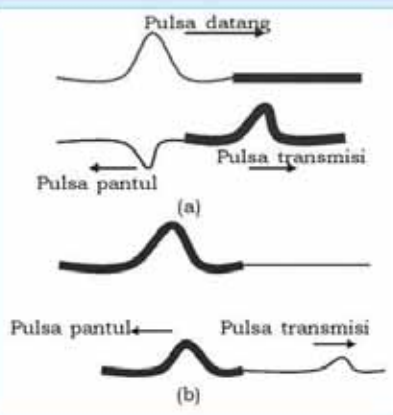
Bagaimana pulsa pantul untuk ujung bebas? Pulsa pantul pada ujung bebas mempunyai bentuk yang sama tegak (tidak terbalik) dan mempunyai amplitudo yang sama pula, lihat gambar 1.5. Tegangan di ujung bebas dipertahankan dengan mengikat tali ke cincin yang massanya dapat diabaikan dan dengan mudah untuk bergerak secara vertikal. Pulsa akan dipantulkan, tetapi tidak mengalami perubahan bentuk (pulsa tidak terbalik). Setelah pulsa mencapai tonggak, pulsa memberikan gaya pada ujung bebas menyebabkan cincin dipercepat ke atas. Dalam proses ini, cincin mempunyai ketinggian yang lebih tinggi dari pulsa datang dengan faktor 2 dan kembali ke posisi awal dengan komponen tegangan arah ke bawah. Ini menghasilkan sebuah pulsa pantul yang tidak terbalik dengan amplitudonya sama dengan amplitudo pulsa datang, lihat gambar 1.5.



Gambar 1.4 Pemantulan gelombang pada ujung tetap



Gambar 1.5 Pemantulan gelombang pada ujung bebas



Gambar 1.6 Pulsa menjalar pada medium yang berbeda diameternya

Gambar 1.6 menunjukkan pulsa menjalar ke kanan melalui sebuah tali yang berdiameter berbeda. Jika pulsa datang melalui tali yang mempunyai diameter lebih kecil, maka pada ujung perbatasan dengan tali yang diameternya lebih besar terjadi proses pemantulan dengan pulsa kebalikan dan transmisi gelombang, lihat gambar 1.6(a). Amplitudo pulsa pantul akan lebih kecil daripada amplitudo pulsa datang, karena sebagian energi yang datang diteruskan ke tali yang lebih besar. Pembalikan pulsa dikarenakan hal yang serupa seperti pada pulsa yang datang pada benda tegar atau ujung tetap.

Jika pulsa menjalar dari tali yang berdiameter lebih besar ke yang kecil, maka pada daerah perbatasan akan terjadi pemantulan dan pentransmisian, lihat gambar 1.6(b). Namun, pada pulsa yang dipantulkan tidak terjadi pembalikan pulsa. Ketinggian atau besarnya amplitudo yang dipantulkan atau yang di transmisikan tergantung pada kerapatan masing-masing. Tentunya jika kedua tali identik, tidak ada diskontinyu di daerah perbatasan dan oleh karena itu tidak terjadi pemantulan.

Kelajuan gelombang pada tali semakin besar jika kerapatan semakin kecil. Pulsa menjalar lebih lambat pada tali yang lebih berat atau besar daripada tali yang lebih ringan atau kecil bila keduanya dikenakan tegangan yang sama.

Secara umum dapat dikatakan bahwa, jika sebuah pulsa gelombang menjalar dari medium A ke medium B dan $v_A > v_B$, yaitu jika B lebih rapat daripada A, maka pulsa yang dipantulkan terbalik. Jika sebuah pulsa gelombang menjalar dari medium A ke B dan $v_A < v_B$, yaitu A lebih rapat daripada B, pulsa pantul tidak terbalik.

C. Gelombang Harmonik

Penjalaran gelombang transversal yang terdapat pada tali dapat dianalisis secara fisis melalui bentuk persamaan matematis. Untuk memudahkan menganalisisnya kita menggunakan bentuk gelombang tali yang merambat secara periodik dan tidak terjadi perubahan bentuk pulsa gelombang terhadap fungsi waktu. Bentuk gelombang ini mempunyai bentuk sinusoidal dan disebut sebagai gelombang harmonik. Perpindahan kurva pulsa gelombang pada saat $t = 0$ dapat dituliskan dalam bentuk persamaan,

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda} x\right) \quad (1.7)$$

di mana A disebut amplitudo gelombang, atau sebagai simpangan maksimum. λ disebut panjang gelombang, yaitu jarak dari dua puncak gelombang yang berdekatan yang mempunyai fase sama. Jika gelombang merambat ke kanan dengan kecepatan fase v , maka gelombang sebagai fungsi waktu dituliskan sebagai,

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x - vt)\right) \quad (1.8a)$$

Jika gelombang merambat ke arah kiri,

$$y = A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(x + vt)\right) \quad (1.8b)$$

Jika hubungan antara periode T , panjang gelombang dan kecepatan fase seperti yang ditunjukkan pada persamaan 1.1–1.3, maka persamaan 1.8a dapat ditulis kembali dalam bentuk,

$$\begin{aligned} y &= A \sin\left(2\pi\left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}\right)\right) \\ &\text{atau} \\ y &= A \sin(kx - \omega t) \end{aligned} \quad (1.9)$$

di mana $k = (2\pi/\lambda)$ disebut bilangan gelombang dan $\omega = (2\pi/T)$ disebut frekuensi sudut.

Persamaan 1.9 adalah bentuk fungsi gelombang yang menunjukkan simpangan (perpindahan) sebagai fungsi posisi dan waktu. Untuk $x = 0$ dan $t = 0$ maka perpindahannya nol ($y = 0$). Jika $x = 0$ dan $t = 0$ namun perpindahan tidak sama dengan nol, maka diperlukan persamaan yang lebih umum untuk fungsi gelombang, yaitu

$$y = A \sin(kx - \omega t - \varphi) \quad (1.10)$$

di mana φ disebut konstanta fase (sudut fase) yang besarnya ditentukan oleh kondisi awal.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 1.2

Sebuah gelombang sinusoidal menjalar ke kanan (arah sumbu x positif) dengan amplitudo sebesar 10 cm, panjang gelombang sebesar 25 cm dan frekuensi sebesar 5 Hz. Pada saat $x = 0$ dan $t = 0$ perpindahan gelombangnya adalah 10 cm. Tentukan bilangan gelombang, periode, frekuensi angular, kecepatan fase gelombang, sudut fase (φ) dan tulis persamaan fungsi gelombang!

Penyelesaian:

Berdasarkan data pada soal,

Diketahui:

- $A = 10 \text{ cm}$
- $\lambda = 25 \text{ cm}$
- $f = 5 \text{ Hz}$

Ditanya:

- a. bilangan gelombang (k)?
- b. periode (T)?
- c. frekuensi angular (ω)?
- d. kecepatan fase (v)?
- e. sudut fase (φ) dan tulis persamaan fungsi gelombang!

Jawab:

$$\text{a. } k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi}{25 \text{ cm}} = 0,25 / \text{cm}$$

$$\text{b. } T = \frac{1}{f} = \frac{1}{5} = 0,2 \text{ s}$$

$$c. \quad \omega = 2\pi f = 2\pi(5\text{ s}^{-1}) = 31,40\text{ rad/s}$$

$$d. \quad v = \lambda f = (25\text{ cm})(5\text{ s}^{-1}) = 125\text{ cm s}^{-1}$$

$$e. \quad y = 10\text{ cm saat } x = 0 \text{ dan } t = 0.$$

Berdasarkan persamaan 1.10 didapatkan, $10\text{ cm} = (10\text{ cm})\sin(-\varphi)$
Atau $\sin(-\varphi) = 1$ sehingga $\varphi = -(\pi/2)$ rad atau $\varphi = -90^\circ$.

Oleh karena itu, persamaan fungsi gelombang dapat ditulis dalam bentuk

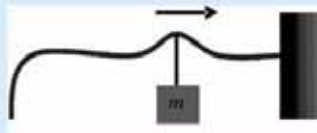
$$y = A \sin\left(kx - \omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$y = A \cos(kx - \omega t)$$

$$y = (10\text{ cm})\cos(0,25\text{ cm}^{-1} \times -31,40\text{ rad.s}^{-1} \times t)$$

D. Transmisi Energi Gelombang pada Tali

Bila gelombang merambat melalui medium, yang merambat bukanlah partikel-partikel dari medium tetapi yang merambat adalah energi. Ini mudah didemonstrasikan dengan menggantungkan massa pada tali yang terentang, kemudian mengirimkan pulsa melalui tali. Ketika energi yang merambat sampai pada massa yang digantung, maka terjadi transfer energi sehingga benda yang bermassa m terangkat ke atas, lihat gambar 1.7.



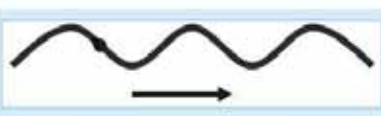
Gambar 1.7 Transmisi energi pada gelombang tali

Perhatikan gelombang harmonik yang menjalar ke kanan, lihat gambar 1.8. Marilah kita amati sebuah elemen panjangnya Δx dan massanya Δm pada tali tersebut. Tiap segmen bergerak secara vertikal dengan gerak harmonik sederhana. Oleh sebab itu, tiap segmen mempunyai frekuensi sudut dan amplitudo sama. Energi total elemen Δx yang massanya Δm yang melakukan gerak harmonik sederhana adalah,

$$\Delta E = \frac{1}{2}(\Delta m)\omega^2 A^2 \quad (1.11)$$

Jika μ adalah massa tali persatuan panjang, maka persamaan 1.11 dapat ditulis dalam bentuk,

$$\Delta E = \frac{1}{2}(\mu \Delta x) \omega^2 A^2 \quad (1.12)$$



Gambar 1.8 Gelombang harmonik pada tali

Besarnya daya pada gelombang merambat yang didefinisikan sebagai energi per satuan waktu, adalah

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2}(\mu \frac{\Delta x}{\Delta t}) \omega^2 A^2$$

atau

$$P = \frac{1}{2}(\mu v) \omega^2 A^2 \quad (1.13)$$

adalah daya yang berbanding lurus dengan kelajuan, kuadrat frekuensi sudut, dan kuadrat amplitudo. Artinya, semakin besar kelajuan, frekuensi sudut atau amplitudo, semakin besar daya yang ditransmisikan.

KISI

Tenaga yang berasal dari gelombang samudra dapat merupakan sumber energi yang kaya. Model bekerjanya "itik salter" ini sedang diuji di dalam tangki gelombang, menghisap banyak energi dari energi setiap gelombang dan mengubah energi itu menjadi listrik. Gelombang yang berlalu dari kanan ke kiri menyebabkan "Itik" yang berbentuk lonjong itu mengangguk-angguk. Anggukan-anggukan itu memutar dinamo di dalamnya dan membangkitkan listrik. Alat ini diciptakan oleh profesor Stephen Salter, ilmuwan Inggris.



Sumber : jendela iptek 3

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, lakukan kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Dari persamaan 1.13, tentukan persamaan besarnya intensitas gelombang!

E. Interferensi Gelombang

Dua fakta yang harus dipahami tentang sifat gelombang yang sangat mendasar adalah,

1. Dapat terjadi superposisi (perpaduan) antara dua gelombang yang melintasi tempat yang sama untuk membentuk pola gelombang baru
2. Intensitas gelombang harmonik berbanding lurus terhadap kuadrat amplitudo.

Kalian akan melihat bagaimana prinsip superposisi dua gelombang harmonik yang mempunyai panjang gelombang sama atau mendekati sama. Hasil gelombang superposisi juga mempunyai pola gelombang harmonik. Dua prinsip gelombang ini dapat digunakan untuk memprediksi semua gejala gelombang yang terjadi di alam. Berikut ini kita akan mendiskusikan superposisi antara dua gelombang dalam satu dimensi.

Prinsip superposisi gelombang sering disebut sebagai interferensi gelombang. Jika kita mempunyai dua gelombang, maka energi total kedua gelombang yang melakukan superposisi tidak merupakan penjumlahan dari masing-masing gelombang namun energi totalnya lebih kecil dari energi masing-masing gelombang tersebut.

Contoh analisis matematis dari superposisi antara dua gelombang, dimana kedua gelombang tersebut mempunyai amplitudo, panjang gelombang dan frekuensi sama dan keduanya menjalar dalam arah yang sama, namun berbeda dalam fase awalnya. Secara matematis untuk gelombang yang menjalar ke kanan adalah,

$$y_1(x, t) = A \cos(kx - \omega t) \quad (1.14)$$

dan gelombang kedua

$$y_2(x, t) = A \cos(kx - \omega t - \phi) \quad (1.15)$$

Dengan prinsip superposisi dua gelombang kita dapatkan,

$$y(x, t) = y_1(x, t) + y_2(x, t) = A[\cos(kx - \omega t) + \cos(kx - \omega t - \phi)] \quad (1.16)$$

Dengan bantuan trigonometri,

$$\cos \alpha + \cos \beta = 2 \cos \left(\frac{\alpha + \beta}{2} \right) \cos \left(\frac{\alpha - \beta}{2} \right) \quad (1.17)$$

persamaan 1.16 dapat disederhanakan,

$$y(x,t) = 2A \cos\left(kx - \omega t - \frac{\varphi}{2}\right) \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.18)$$

Persamaan 1.18 menunjukkan superposisi dari dua gelombang harmonik akan menghasilkan gelombang harmonik yang lain, dimana frekuensi dan panjang gelombang sama namun mempunyai beda fase awal dan amplitudo. Secara umum, persamaan 1.18 identik dengan persamaan 1.15, dimana

$$A' = 2A \cos\left(\frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.19)$$

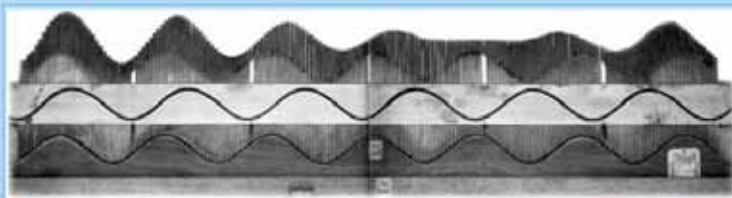
yaitu amplitudo gelombang harmonik hasil superposisi dua gelombang, sehingga persamaan 1.18 dapat ditulis kembali,

$$y(x,t) = A' \cos\left(kx - \omega t - \frac{\varphi}{2}\right) \quad (1.20)$$

yang mana identik dengan persamaan 1.15, yaitu sebagai persamaan fungsi gelombang harmonik.

Brilian

Segaris tongkat kuningan dipotong dengan kepanjangan yang berbeda-beda sehingga ujung-ujung atasnya membuat bentuk gelombang. Lempengan kayu juga berbentuk gelombang dipasang di bawah deretan potongan kuningan tadi (lihat gambar!) Analisislah apa yang akan terjadi pada ujung-ujung potongan kuningan ketika mengikuti kombinasi kedua gelombang itu! Diskusikan hasil analisismu dengan teman-temanmu!



Sumber: Jendela Iptek 3

Karena intensitas berbanding lurus terhadap kuadrat amplitudo sehingga intensitas hasil superposisi dua gelombang adalah,

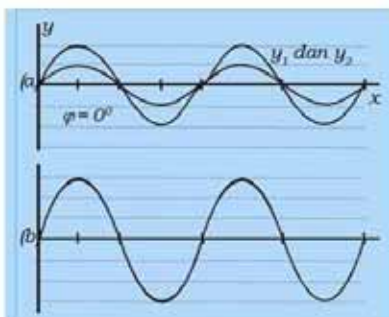
$$I' = \text{konstanta } A'^2 = 4 \cos^2\left(\frac{\varphi}{2}\right) I \quad (1.21)$$

di mana $I = \text{konstanta } A^2$ (1.22)

Persamaan 1.22 adalah intensitas dari masing-masing gelombang sebelum superposisi. Intensitas superposisi. Pada persamaan 1.21 mempunyai harga yang bervariasi tergantung pada harga $\cos^2 (\varphi/2)$, yaitu berkisar antara +1 sampai nol. Oleh karena itu, intensitas superposisi bervariasi antara 4 kali intensitas gelombang masing-masing atau nol.

Berdasarkan persamaan 1.19, amplitudo hasil superposisi mempunyai harga yang bervariasi tergantung pada nilai dari $(\varphi/2)$.

Untuk $\varphi/2 = 0$ maka $\cos(\varphi/2) = 1$, maka harga amplitudo hil superposisi sama dengan $2 \times$ amplitudo masing-masing gelombang yang mengalami superposisi, lihat gambar 1.9(b).



Gambar 1.9 Interferensi gelombang
a) Dua gelombang yang memiliki amplitudo berbeda, tetapi memiliki fase sama b) Hasil interferensi gelombang pada (a)

Dalam keadaan seperti ini kedua gelombang yang berinterferensi dikatakan sefase dan terjadi interferensi konstruktif dimana puncak dan lembah gelombang terjadi pada posisi yang sama. Secara umum, interferensi konstruktif terjadi jika $\cos(\varphi/2) = \pm 1$ atau untuk $\varphi = 0, 2\pi, 4\pi, \dots$. Sebaliknya $\varphi = \pi$ atau bilangan ganjil kali π maka terjadi interferensi destruktif, karena menghasilkan amplitudo superposisi sama dengan nol $\cos(\varphi/2) = \cos(\pi/2) = 0$. Artinya bahwa posisi puncak gelombang dari gelombang yang satu sama dengan posisi lembah dari gelombang kedua, lihat gambar 1.9(b).

Untuk meningkatkan **kemampuan personal dan sosial** kalian, lakukan kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Bagaimana tentang energi total superposisi dua gelombang seperti yang diutarakan dalam persamaan berikut?

$$y = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} (x - vt) \right) \text{ dan } y = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} (x + vt) \right)$$

F. Gelombang Berdiri

Jika ada pulsa yang merambat pada seutas tali, maka pada saat sampai di ujung tali, pulsa akan dipantulkan kembali. Ketika pulsa sampai di ujung tali yang terikat tetap, maka pulsa pantulnya terbalik dan menjalar ke arah kiri dengan amplitudo yang sama. Dengan kata lain, pulsa terpantul mempunyai beda sudut fase = 180° atau π rad dengan pulsa yang datang, maka antara gelombang pantul dan gelombang datang mempunyai beda fase $\frac{1}{2}$. Jika ujung tali yang dipegang digetarkan terus-menerus, maka gelombang datang dan gelombang pantul bentuknya sama, tetapi saling berbalik sehingga akan berinterferensi dan membentuk gelombang berdiri.

Perhatikan dua gelombang sinusoidal dalam medium yang sama dengan amplitudo, frekuensi dan panjang gelombang sama, tetapi mempunyai arah berlawanan. Kedua fungsi gelombang dapat dituliskan dalam bentuk,

$$y_1(x,t) = A \sin(kx - \omega t)$$

$$y_2(x,t) = A \sin(kx + \omega t)$$

di mana y_1 adalah gelombang yang menjalar arah kanan, y_2 adalah gelombang menjalar arah kiri, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ dan $\omega = \frac{2\pi}{T}$. Dengan menggunakan prinsip superposisi, menghasilkan fungsi gelombang,

$$y = y_1 + y_2 = A \sin(kx - \omega t) + A \sin(kx + \omega t)$$

Dengan menggunakan identitas trigonometri,

$$\sin \alpha \pm \sin \beta = 2 \sin \left(\frac{\alpha \pm \beta}{2} \right) \cos \left(\frac{\alpha \mp \beta}{2} \right),$$

$$\text{maka } y = 2A \sin \left(\frac{(kx - \omega t) + (kx + \omega t)}{2} \right) \cos \left(\frac{(kx - \omega t) - (kx + \omega t)}{2} \right)$$

$$y = 2A \sin(kx) \cos(\omega t) \quad (1.23)$$

Persamaan 1.23 menunjukkan fungsi gelombang untuk gelombang berdiri atau gelombang stasioner pada ujung tetap. Fungsi gelombang ini menunjukkan bahwa untuk gelombang berdiri mempunyai amplitudo $2A \sin kx$ yang menunjukkan bahwa amplitudonya bervariasi dengan posisi dan setiap partikel pada tali melakukan gerak harmonik sederhana dengan frekuensi sama. Ini sedikit kontradiksi dengan gelombang harmonik yang menjalar,

di mana untuk semua partikel berosilasi dengan frekuensi dan amplitudo sama.

Jika $A' = 2A \sin(kx)$ sebagai amplitudo pada gelombang berdiri maka nilai maksimum yang dimungkinkan adalah $\sin(kx) = 1$ sehingga $A' = 2A$ (amplitudo hasil superposisi dua kali dari amplitudo secara individu. Ini terjadi jika kondisi $\sin(ky) = \pm 1$ atau

$$kx = \frac{\pi}{2}, \frac{3\pi}{2}, \frac{5\pi}{2}, \dots$$

Karena $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, posisi maksimum amplitudo yang disebut puncak gelombang diberikan oleh,

$$x = \frac{\lambda}{4}, \frac{3\lambda}{4}, \frac{5\lambda}{4}, \dots = \frac{n\lambda}{4} \quad (1.24)$$

Di mana n adalah 1, 3, 5, Perhatikan bahwa jarak terdekat antar puncak dipisahkan oleh jarak $\frac{\lambda}{2}$. Hal yang serupa terdapat pada gelombang dengan amplitudo minimum ($A' = 0$) yang terjadi pada kondisi $kx = 0$ atau $kx = \pi, 2\pi, 3\pi, \dots$ dan

$$x = \frac{\lambda}{2}, \frac{2\lambda}{2}, \frac{3\lambda}{2}, \dots = \frac{n\lambda}{2} \quad (1.25)$$

di mana $n = 0, 1, 2, 3, \dots$. Titik-titik di mana amplitudonya adalah nol disebut titik simpul yang juga dipisahkan oleh jarak sebesar $\frac{\lambda}{2}$. Jarak antara lembah dengan puncak yang berdekatan sebesar $\frac{\lambda}{4}$.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 1.3

Dua buah gelombang menjalar saling berlawanan arah untuk menghasilkan gelombang berdiri. Fungsi gelombang masing-masing diberikan oleh persamaan,

$$y_1(x, t) = (3 \text{ cm}) \sin(2x - 2t)$$

$$y_2(x, t) = (3 \text{ cm}) \sin(2x + 2t)$$

di mana x dan y dinyatakan dalam cm.

- Tentukan simpangan maksimum untuk $x = 3,8 \text{ cm}$!
- Tentukan posisi simpul dan puncak gelombang!

Penyelesaian:**Diketahui:**

$$y_1(x,t) = (3\text{ cm})\sin(2x - 2t)$$

$$y_2(x,t) = (3\text{ cm})\sin(2x + 2t)$$

y_1 adalah simpangan gelombang yang merambat ke kanan dan y_2 simpangan gelombang yang merambat arah kiri. Simpangan dan posisi dinyatakan dalam satuan cm.

Ditanya:

- y_{\max} di $x = 3,8\text{ cm}$?
- posisi x untuk simpul dan puncak?

Jawab:

- Berdasarkan persamaan fungsi gelombang, baik untuk y_1 dan y_2 mempunyai bilangan gelombang ($k = 2\text{ cm}^{-1}$), frekuensi sudut ($\omega = 2\text{ s}^{-1}$) dan amplitudo gelombang ($A = 3\text{ cm}$) yang sama. Berdasarkan persamaan 1.23

$$y = 2A\sin(kx)\cos(\omega t)$$

$$y_{\max} = 2 \times 3\text{ cm}[\sin(2\text{ cm}^{-1})(3,8\text{ cm})]$$

$$y_{\max} = 6\text{ cm}[\sin(7,6\text{ rad})] = 5,74\text{ cm}$$

- Karena $k = \frac{2\pi}{\lambda} = 2\text{ cm}^{-1} \rightarrow \lambda = \pi\text{ cm}$, maka dari persamaan 1.24 didapatkan posisi puncak berada pada, $x = \frac{n\pi}{4}\text{ cm}$ ($n = 1, 3, 5$) dan untuk posisi simpul berdasarkan persamaan 1.29, $x = \frac{n\pi}{2}\text{ cm}$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$)

1. Gelombang Berdiri Pada Tali dengan Kedua Ujung Tetap

Perhatikan pada sebuah tali yang panjangnya L dengan kedua ujungnya dalam kondisi tetap atau terikat. Bila pada salah satu ujung dilewati gelombang secara kontinyu, maka akan terjadi gelombang pantul yang kontinyu pula dari ujung yang lain sehingga terjadi superposisi antara gelombang datang dan gelombang pantul secara kontinyu pula, lihat gambar 1.10. Pada dasarnya seutas tali mempunyai sejumlah pola getaran secara alami yang disebut mode normal. Setiap mode terkait dengan frekuensi spesifiknya. Untuk menunjukkan beberapa mode pada gelombang berdiri, kita dapat menyelidikinya dengan percobaan Melde yang perangkat alatnya ditunjukkan pada gambar 1.11.

Perhatikan gambar 1.10(a) yang menunjukkan terbentuknya simpul gelombang di kedua ujung tali yang tetap. Gelombang yang ditunjukkan pada gambar 1.10(a) adalah gelombang pada mode normal pertama, di mana pada tali sepanjang L hanya terdapat satu puncak atau pada tali sepanjang L hanya terbentuk $\frac{1}{2}$ panjang gelombang. Maka pada mode normal pertama $L = \frac{\lambda_1}{2}$ sehingga diperoleh $\lambda_1 = 2L$

Mode berikutnya pada tali sepanjang L terbentuk 2 perut 3 simpul yang berarti $L = \lambda_2$, lihat gambar 1.10(b), atau $\lambda_2 = \frac{2L}{2}$.

Pada mode normal ketiga terbentuk 4 simpul 3 perut pada tali sepanjang L , lihat gambar 1.10(c), maka $\frac{3}{2}\lambda_3 = L$, maka $\lambda_3 = \frac{2}{3}L$. Dari ketiga kondisi di atas maka secara umum dapat disimpulkan bahwa untuk mode normal ke n , pada tali sepanjang L terbentuk $(n + 1)$ simpul dan n perut, hal ini berarti $L = \frac{n}{2}\lambda_n$ atau

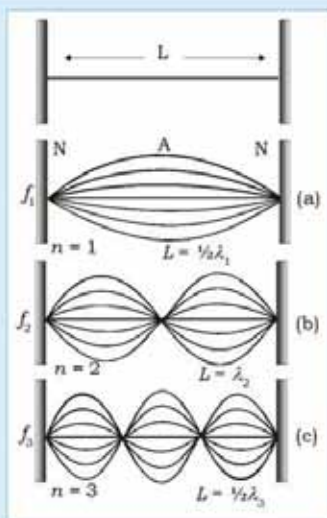
$$\lambda_n = \frac{2L}{n} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.26)$$

dengan indek n mengacu pada mode getaran ke n .

Substitusikan persamaan 1.1 dan 1.4 ke dalam persamaan 1.26 sehingga diperoleh bentuk persamaan untuk frekuensi mode yang diberikan oleh,

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{2L}v \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \text{ dan}$$

$$f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{2L}\sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (1.27)$$



Gambar 1.10 Gelombang berdiri

Besarnya kecepatan $v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ ditunjukkan setelah kalian melakukan percobaan melde di bawah!

Frekuensi terendah yang berkaitan dengan $n = 1$ disebut sebagai frekuensi dasar,

$$f_1 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (1.28)$$

Dari persamaan 1.27 dapat ditunjukkan bahwa nilai $n = 0, 1, 2, 3, \dots$ yang berarti bahwa mode frekuensi berikutnya adalah bentuk perkalian terhadap n sehingga merupakan bentuk deret harmonik. f_1 adalah deret harmonik dasar, dan f_2 adalah harmonik kedua yang besarnya adalah dua kali frekuensi dasar, $f_2 = 2f_1$.

Contoh Soal 1.4

Sebuah piano dengan tali C mempunyai frekuensi dasar 254 Hz dan tali A mempunyai frekuensi dasar 450 Hz.

- Hitung frekuensi dua harmonik berikutnya untuk tali C!
- Jika dua tali C dan A sama baik massa per satuan panjang maupun panjang talinya, tentukan perbandingan gaya tegangan dari kedua tali tersebut!

Penyelesaian:

Diketahui:

$$f_{1C} = 254 \text{ Hz}$$

$$f_{2A} = 450 \text{ Hz}$$

Ditanya:

- f_{2C} dan f_{3C} !
- perbandingan gaya tegangan tali!

Jawab:

$$\text{a. } f_{2C} = 2f_{1C} = 508 \text{ Hz}$$

$$f_{3C} = 3f_{1C} = 762 \text{ Hz}$$

- Untuk tali yang bergetar, baik untuk tali C maupun C

$$\text{memberikan frekuensi dasar, } f_{1C} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_C}{\mu}} \rightarrow F_C = \frac{(2Lf_{1C})^2}{\mu}$$

$$\text{dan } f_{1A} = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{F_A}{\mu}} \rightarrow F_A = \frac{(2Lf_{1A})^2}{\mu}$$

Karena μ dan L untuk kedua tali adalah sama, maka

$$\frac{F_A}{F_C} = \frac{(f_A)^2}{(f_C)^2} = \frac{(450)^2}{(254)^2} = 3,24$$

2. Cepat Rambat Gelombang pada Dawai

Untuk menentukan cepat rambat gelombang, v , pada seutas dawai kita lakukan percobaan Melde yang perangkat alatnya ditunjukkan pada gambar 1.11.

Kegiatan ini diharapkan dapat meningkatkan **kemampuan akademik, personal dan vokasional kalian**.

Kegiatan 1.1

Tujuan :

Untuk menentukan faktor-faktor yang mempengaruhi cepat rambat gelombang.

Alat dan bahan :

Ditunjukkan pada gambar 1.11: vibrator, power supply beberapa dawai (senar) yang jenis, panjang, dan diameternya berbeda-beda, statif dan beberapa beban.

Prosedur :

1. Dari gambar 1.11 kalian dapat mengamati bagaimana cara memasang dawai yang digunakan sebagai medium rambatan gelombang.
2. Salah satu ujung dawai ikatkan pada vibrator yang dihubungkan dengan sumber tegangan yang sesuai, sedangkan ujung dawai yang lain diberi beban F melalui katrol.
3. Setelah vibrator dihidupkan/digetarkan, pada dawai terlihat bentuk gelombang berdiri (stasioner) seperti yang ditunjukkan pada gambar 1.11 yang terjadi sebagai hasil interferensi antara gelombang datang dan gelombang pantul dengan mengatur besarnya beban yang digantung pada ujung dawai!
4. Catatlah berapa gelombang yang terbentuk, berapa frekuensi pada vibrator, berapa panjang dawai antara kedua ujung, berapa diameternya, berapa besar beban yang digantung dan apa jenis dawainya.



Sumber: Dok. Penerbit

Gambar 1.11 Perangkat percobaan Melde

5. Dari jumlah gelombang yang terbentuk dan panjang tali yang digunakan, kalian dapat menentukan besarnya panjang gelombang dari gelombang yang merambat pada dawai.
6. Kalau kalian menggunakan pers 1.1 dan frekuensi pada vibrator, maka kalian dapat menentukan cepat rambat gelombang pada dawai.
7. Ulangi kegiatan pada langkah (3), (4), (5), dan (6) dengan besar beban yang berbeda sampai 4 kali, misalnya m_1 , $2m_1$, $4m_1$, $8m_1$.
8. Ulangi kegiatan pada langkah (3), (4), (5), dan (6) dengan diameter dawai yang berbeda sampai 4 kali, misalnya d , $2d$, $4d$, $8d$.
9. Ulangi kegiatan pada langkah (3) dan (4) dengan jenis dawai yang berbeda sampai 4 kali (dawai plastik, aluminium, dimana tiap dawai yang berbeda memiliki massa jenis yang berbeda).
10. Buatlah tabel semua data yang kalian ukur dan hitung kecepatan merambat gelombang tersebut! Dari tabel kalian akan melihat suatu pola bilangan hasil perhitungan yang terkait dengan cepat rambat gelombang.

Kesimpulan:

Dari kegiatan di atas dapat disimpulkan faktor-faktor yang mempunyai cepat rambat gelombang pada dawai adalah

Dari tabel tersebut, kalian bisa menyimpulkan bahwa makin besar beban makin besar cepat rambatnya, makin besar diameter dawai makin kecil cepat rambatnya, makin besar kerapatan (massa jenis) bahan dawai yang digunakan, makin kecil cepat rambatnya. Dari hasil perhitungan, kalian dapat menunjukkan bahwa cepat rambat gelombang pada dawai,

1. Berbanding lurus dengan akar berat beban (F),
2. Berbanding terbalik dengan diameter dawai (d) atau akar luas penampang dawai (A) dan
3. Berbanding terbalik dengan akar kerapatan bahan (ρ) atau massa bahan per satuan volume, yang secara matematis dapat dinyatakan sebagai,

$$v = \sqrt{\frac{F}{\rho A}} \quad (1.29)$$

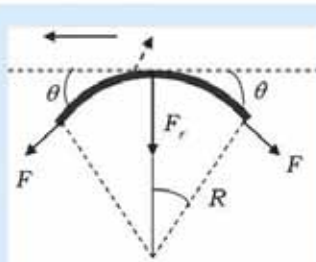
Dari percobaan Melde di atas dapat disimpulkan bahwa cepat rambat gelombang pada dawai berbanding lurus dengan akar tegangan dan berbanding terbalik dengan akar luas penampang dan massa persatuan volume. Persamaan 1.29 juga dapat dinyatakan sebagai,

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad (1.30)$$

... v adalah kecepatan gelombang pada benang/tali/dawai/senar dinyatakan dalam satuan m.s^{-1} , F adalah tegangan/beban yang dinyatakan dalam newton dan m adalah massa benang per satuan panjang dinyatakan dalam kg.m^{-1} .

Persamaan 1.29 dan 1.30 juga dapat dijabarkan dengan menggunakan prinsip geometris untuk menguraikan komponen gaya pada tegangan tali dan bentuk gelombang didekati sebagai bentuk kurva lingkaran yang ditunjukkan pada gambar 1.12.

Pada gambar 1.12 ditunjukkan bagian sebuah tali yang panjangnya ΔS dan dilewati oleh rambatan sebuah gelombang dengan kecepatan v . Komponen tegangan tali arah horisontal saling meniadakan dan komponen tegangan tali arah vertikal yang besarnya untuk tiap segmen adalah $F \sin \theta$ yang keduanya bekerja dengan arah radial yaitu ke pusat kurva. Total gaya radialnya adalah $2F \sin \theta = 2F$ untuk kecil yaitu simpangan/tinggi kurva jauh lebih kecil daripada panjang tali. Besarnya gaya ini sama dengan gaya sentripetal, F_r .



Gambar 1.12 Rambatan gelombang pada tali

$$F_r = 2F = m \frac{v^2}{R} \quad (1.31)$$

Panjang potongan dawai $\Delta S = R2\theta$ dan massanya, $m = \mu \Delta S = \rho A \Delta S$. Oleh karena itu,

$$m = 2\mu R\theta = 2\rho AR\theta \quad (1.32)$$

Kita substitusikan persamaan 1.32 ke dalam persamaan 1.31, didapatkan,

$$2F\theta = 2\mu R\theta \frac{v^2}{R} \quad \text{atau} \quad 2F\theta = 2\rho AR\theta \frac{v^2}{R}$$

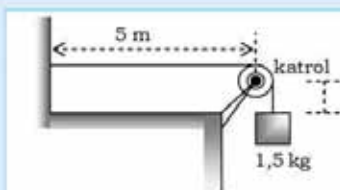
$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} \quad \text{atau} \quad v = \sqrt{\frac{F}{\rho A}}$$

Jadi, dengan menggunakan prinsip geometri yang sederhana untuk meninjau gaya tegangan tali dan kecepatannya, diperoleh persamaan cepat rambat gelombang seperti yang diperoleh lewat percobaan.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 1.5

Seutas dawai yang homogen mempunyai massa 0,20 kg dan panjang 5 m. Tegangan dipertahankan dalam dawai tersebut dengan cara memberikan beban pada salah satu ujung dawai dengan massa 1,5 kg. Tentukan kelajuan pulsa pada dawai tersebut!



Gambar 1.13 Sistem beban-katrol

Berdasarkan data dari soal dan data dari gambar.

Diketahui:

$$\begin{aligned} m_{\text{tali}} &= 0,20 \text{ kg} \\ L_{\text{tali}} &= 5 \text{ m} \\ M_{\text{bandul}} &= 1,5 \text{ kg} \end{aligned}$$

Ditanya:

Kelajuan pulsa dalam tali dawai (v)!

Jawab:

Gaya tegangan pada tali,

$$F = mg = 1,5 \text{ kg} (9,8 \text{ m/s}^2) = 14,7 \text{ N} \text{ (perhitungan ini dilakukan dengan mengabaikan massa tali dawai).}$$

Massa per satuan panjang,

$$\mu = \frac{m_{\text{tali}}}{L_{\text{tali}}} = \frac{0,2 \text{ kg}}{5 \text{ m}} = 0,04 \text{ kg/m}$$

Kelajuan gelombang berdasarkan persamaan 1.30,

$$v = \sqrt{\frac{F}{\mu}} = \sqrt{\frac{14,7 \text{ N}}{0,04 \text{ kg/m}}} = 19,17 \text{ m/s}$$

Tugas 1.1

1. Sebuah gelombang, transversal mempunyai simpangan (y) fungsi waktu (t) dan posisi (x), berbentuk $y = 0,1 \sin (6\pi t - 2x)$. Satuan dalam SI.
 - a. Jenis apakah gelombang itu?
 - b. Hitunglah amplitudo, frekuensi dan laju perambatan gelombang!
 - c. Berapa panjang gelombang dari gelombang itu?
2. Kerjakan soal nomor (1) untuk simpangan yang memenuhi persamaan $y = 0,2 \cos (100 \pi t + 5x + \frac{1}{2} \pi)$!
3. Hitunglah energi gelombang pada soal (1) dan (2).

Rangkuman

1. Gelombang mekanik adalah gelombang yang membutuhkan medium dalam perambatannya. Syarat terbentuknya gelombang mekanik adalah:
 - a. Sumber gangguan/usikan
 - b. Medium yang dapat diusik
 - c. Beberapa hubungan fisis yang mana bagian medium yang berdekatan saling berpengaruh.
2. Hubungan antara kecepatan gelombang, panjang gelombang, periode dan frekuensi gelombang dinyatakan,
$$v = \lambda f = \frac{\lambda}{T}$$
3. Pemantulan gelombang pada ujung tetap menghasilkan amplitudo gelombang pantai yang arahnya berlawanan dari amplitudo gelombang datang, sedangkan pada pemantulan gelombang pada ujung bebas menghasilkan amplitudo gelombang pantul yang sama dengan amplitudo gelombang datang.
4. Persamaan simpangan pada gelombang harmonik dinyatakan,

$$y = A \sin 2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right)$$

5. Energi gelombang pada tali yang melakukan gerak harmonik sederhana dinyatakan dalam,

$$\Delta E = \frac{1}{2}(\Delta m)\omega^2 A^2$$

6. Besarnya daya pada gelombang yang merambat didefinisikan sebagai energi per satuan waktu, dinyatakan

$$P = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{1}{2}\left(\mu \frac{\Delta x}{\Delta t}\right)\omega^2 A^2$$

$$= \frac{1}{2}(\mu v)\omega^2 A^2$$

7. Persamaan dua gelombang yang berinterferensi dinyatakan dalam

$$y_{(x,t)} = 2A \cos(kx - \omega t - \frac{\varphi}{2}) \cos(\frac{\varphi}{2})$$

$$= A'(kx - \omega t + \frac{\varphi}{2})$$

8. Intensitas hasil superposisi dua gelombang adalah

$$I' = \text{konstanta } A'^2 = 4 \cos^2(\frac{\varphi}{2}) I$$

9. Persamaan simpangan gelombang berdiri adalah,

$$y = 2A \sin(kx) \cos(\omega t)$$

10. Amplitudo gelombang berdiri bernilai maksimum jika

$$x = \frac{n\lambda}{4} \text{ dan akan bernilai minimum jika } x = \frac{n\lambda}{2}$$

11. Frekuensi gelombang berdiri pada kedua ujung tetap dinyatakan

$$f_n = \frac{v}{\lambda n} = \frac{n}{2L} v = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} ; (n = 1, 2, 3, \dots)$$

12. Besarnya kecepatan merambat gelombang pada dawai

$$\text{dinyatakan dalam } v = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$$

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

1. Bila pada ujung tali yang bebas disentakkan ke atas dan ke bawah, maka
 - a. pada tali terbentuk gelombang longitudinal dimana arah simpangan tegak lurus arah rambatan
 - b. pada tali terbentuk gelombang transversal dimana arah simpangan tegak lurus arah rambatan
 - c. pada tali terbentuk gelombang transversal dimana arah simpangan searah dengan arah rambatan
 - d. pada tali terbentuk gelombang longitudinal dimana arah simpangan searah dengan arah rambatan
 - e. pada tali terbentuk gelombang longitudinal dan transversal
2. Persamaan fungsi gelombang harmonik dinyatakan sebagai $y(x,t) = A \sin (kx - \omega t - \phi)$, pernyataan-pernyataan di bawah ini benar, **kecuali**
 - a. $\omega = 2\pi f$ di mana ω adalah frekuensi anguler dan f adalah frekuensi gelombang harmonik yang menunjukkan banyaknya puncak yang melewati titik tetap per satuan waktu
 - b. $k = 2\pi/\lambda$ di mana k adalah angka gelombang dan λ adalah panjang gelombang yang merupakan jarak antara dua puncak atau dua lembah
 - c. $\omega = kv$ di mana v adalah cepat rambat gelombang yang juga disebut sebagai kecepatan fase
 - d. $\omega = kv$ di mana v adalah kecepatan simpangan gelombang atau kecepatan fase yang dinyatakan sebagai $v = -\omega A \cos (kx - \omega t - \phi)$
 - e. $T = 1/f$ di mana T adalah periode, yaitu waktu yang diperlukan untuk perambatan jarak sebesar satu panjang gelombang
3. Pada pemantulan gelombang oleh ujung tetap, maka...
 - a. antara gelombang datang dan gelombang pantul fasenya berbeda $\frac{1}{2}$
 - b. antara gelombang datang dan gelombang pantul fasenya sama

- c. antara gelombang datang dan gelombang pantul fasenya berbeda 1
 - d. antara gelombang datang dan gelombang pantul fasenya berbeda $\frac{1}{4}$
 - e. antara gelombang datang dan gelombang pantul fasenya berbeda $\frac{3}{4}$
4. Hasil interferensi antara gelombang datang $y(x,t) = A \sin(kx - \omega t - \phi)$ dengan gelombang yang dipantulkannya pada ujung bebas adalah....
- a. $y_{\text{int}}(x,t) = 2A \cos(kx - \omega t - \phi) \sin kx$ di mana amplitudonya tergantung posisi
 - b. $y_{\text{int}}(x,t) = 2A \cos(kx - \omega t - \phi)$ yang sama dengan gelombang datang kecuali amplitudonya menjadi 2 kali dan arahnya selalu berlawanan
 - c. $y_{\text{int}}(x,t) = 2A \sin(kx - \omega t - \phi) \cos kx$ di mana amplitudonya tergantung posisi
 - d. $y_{\text{int}}(x,t) = 2A \sin(kx - \phi) \cos(\omega t)$ di mana amplitudonya hanya merupakan fungsi posisi dan konstanta fase sudut
 - e. tidak ada jawaban yang benar
5. Sebuah gelombang harmonik dinyatakan sebagai $y(x,t) = (0,12\text{m}) \sin(1,57x - 31,4t)$. Pernyataan-pernyataan di bawah ini benar, **kecuali**....
- a. $f = 1/T = 1/5 \text{ Hz}$
 - b. $f = 1/T = 5 \text{ Hz}$
 - c. kecepatan simpangan di titik $x = 0$ dan pada saat $t = 0$ adalah $v_y = -3,77 \text{ m/s}$
 - d. $\lambda = 4 \text{ m}$
 - e. cepat rambat gelombang adalah 20 m/s
6. Pernyataan-pernyataan di bawah ini benar, **kecuali**....
- a. gelombang longitudinal adalah gelombang mekanik dimana simpangan partikel-partikel mediumnya searah dengan arah kecepatan rambat gelombang
 - b. gelombang elektromagnetik adalah gelombang yang dapat merambat tanpa medium
 - c. pada gelombang longitudinal, satu panjang gelombang didefinisikan sebagai jarak antara dua rapatan yang berturutan
 - d. beda fase antara gelombang datang dan gelombang pantul pada pemantulan gelombang untuk ujung bebas adalah $\frac{1}{2}$
 - e. interferensi gelombang antara gelombang datang dan gelombang pantul pada kedua ujung tali yang tetap disebut gelombang berdiri

7. Besarnya cepat rambat gelombang pada tali adalah....
 - a. berbanding lurus dengan akar tegangan tali dan berbanding terbalik dengan akar luas penampang dan massa jenis tali
 - b. berbanding lurus dengan akar tegangan tali, luas penampang dan massa jenis tali
 - c. berbanding terbalik dengan akar tegangan tali, luas dan massa jenis tali
 - d. berbanding lurus dengan akar tegangan tali dan luas penampang serta berbanding terbalik dengan akar massa jenis tali
 - e. berbanding lurus dengan akar tegangan tali dan berbanding terbalik dengan akar luas penampang tali dan massa tali per satuan panjang
8. Pada seutas tali yang tegang, gelombang transversal merambat dengan kelajuan 50m/s. Bila tiap 10m tali tersebut massanya 0,08kg, maka besarnya tegangan pada tali adalah....
 - a. 200 N
 - b. 2000 N
 - c. 20 N
 - d. 0,4 N
 - e. 40 N
9. Batas elastisitas kawat baja adalah $2,7 \times 10^{10}$ Pa. Bila massa jenis $\rho = 7860 \text{ kg/m}^3$, maka cepat rambat gelombang pada kawat ini tanpa melampaui batas elastisitasnya adalah
 - a. 586 m/s
 - b. 5860 m/s
 - c. 58,6 m/s
 - d. 5,86 m/s
 - e. 58600 m/s
10. Pada saat terjadi gempa bumi dihasilkan dua macam gelombang sekaligus, yaitu gelombang transversal (karena tegangan geser) dan longitudinal (karena tekanan). Bila gelombang transversal mempunyai cepat rambat yang lebih kecil dari gelombang longitudinal, maka....
 - a. kedua gelombang akan terdeteksi dalam waktu yang bersamaan
 - b. gelombang longitudinal terdeteksi lebih dahulu dari gelombang transversal dan beda waktu deteksi dapat digunakan untuk mengestimasi pusat gempa
 - c. gelombang transversal terdeteksi lebih dahulu dari gelombang longitudinal dan beda waktu deteksi dapat digunakan untuk mengestimasi pusat gempa

- d. kedua gelombang akan terdeteksi dalam waktu yang bersamaan dan waktu deteksi dapat digunakan untuk mengestimasi pusat gempa
- e. makin cepat rambat gelombang, makin cepat gelombang terdeteksi dan makin besar jarak pusat gempa dari pusat pendeteksian

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Persamaan gelombang pada permukaan air laut dinyatakan sebagai $y(x,t) = (1,5 \text{ m}) \sin (0,63 (x-vt))$. Bila gelombang air laut tersebut merambat dengan kecepatan 1,2 m/s, tentukan
 - a. Panjang gelombang dan frekuensi gelombang tersebut!
 - b. Gambarkan grafik $y(x,t)$ bila gelombang telah merambat sejauh 15 m!
2. Tunjukkan bahwa persamaan-persamaan gelombang berikut ini $y(x,t) = A \sin (k(x-vt))$; $y(x,t) = A \sin (2\pi(\frac{x}{\lambda} - ft))$; $y(x,t) = A \sin (\omega(\frac{x}{v} - t))$; $y(x,t) = A \sin (2\pi(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T}))$; dapat diubah menjadi $y(x,t) = A \sin (kx - \omega t)$!
3. Sebuah gelombang yang panjang gelombangnya 20 cm merambat pada arah sumbu x positif. Gelombang tersebut mempunyai periode 10 s dan amplitudo 4 cm.
 - a. Buatlah grafik $y(x,t)$ sebagai fungsi x , dari $x = 0$ sampai $x = 30 \text{ cm}$!
 - b. Tentukan cepat rambat gelombang tersebut!
 - c. Tuliskan persamaan gelombang tersebut!
 - d. Tentukan kecepatan dan percepatan pada saat $t = 5 \text{ s}$ di titik $x = 0$ dan $x = 10 \text{ cm}$!
4. Gelombang harmonik merambat pada tali dengan kecepatan 40 cm/s. Persamaan simpangan di titik $x = 10 \text{ cm}$ dinyatakan sebagai $y = 5 \text{ cm} \sin(1-(4t)\text{s}^{-1})$. Bila massa tali per satuan panjang adalah 4 gram/cm, (a) Tentukan gaya tegangan pada tali! (b) Tentukan besarnya panjang gelombang dan frekuensi! (c) Tuliskan persamaan gelombang yang merupakan fungsi posisi dan waktu!

5. Kelajuan gelombang elektromagnetik adalah 3×10^8 m/s. Bila panjang gelombang sinar tampak untuk violet 400 nm dan untuk merah 700 nm, (a) Tentukan rentang frekuensi pada sinar tampak! (b) Bila rentang frekuensi gelombang radio yang lebih pendek adalah 1,5 – 300 MHz, tentukan rentang panjang gelombangnya! (c) Bila rentang panjang gelombang sinar-X adalah 0,01 nm – 5 nm, tentukan rentang frekuensinya!
6. Gelombang transversal merambat dari P ke Q dengan cepat rambat 15 m/s, frekuensi 5 Hz dan amplitudonya 5 cm. Jika jarak PQ 15 m, (a) Tentukan banyaknya gelombang sepanjang PQ, (b) Tentukan persamaan gelombang tersebut!
7. Sebuah batu di jatuhkan ke dalam air danau sehingga pada permukaan air terjadi lingkaran gelombang yang berjalan. Jika lingkaran pertama menempuh jarak 5 m dalam 2 sekon, dan sepanjang itu terdapat 20 gelombang. Tentukan cepat rambat, frekuensi dan panjang gelombang air tersebut!
8. Sebuah garputala yang frekuensinya 340 Hz digunakan untuk menggetarkan dawai yang panjangnya 1,2 m, pada dawai terbentuk 2 gelombang. (a) Tentukan cepat rambat gelombang pada dawai! (b) Tentukan frekuensi dawai mode normal pertama!
9. Sebuah senar gitar, panjang antara kedua ujung tetapnya adalah 90 cm, massa per satuan panjangnya 7,5 gram/m dan diberi tegangan 300 N. Bila pada senar tersebut terbentuk gelombang berdiri yang terdiri dari $3/2$ gelombang, (a) Tentukan cepat rambat, panjang gelombang dan frekuensi gelombang pada senar tersebut! (b) Tentukan frekuensi mode normal pertamanya!
10. Sebuah gelombang merambat dari sumber S ke kanan dengan kelajuan 8 m/s, frekuensinya 16 Hz dan amplitudonya 6 cm. Gelombang tersebut melalui titik P yang berjarak 9,5 m dari sumber S. Jika S telah bergetar selama 1,25 sekon dan arah gerakanya ke atas, tentukan simpangan di titik P pada saat itu!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawabanmu dengan teman-temanmu. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab II

Gelombang Bunyi



Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang bunyi serta menerapkan konsep dan prinsip gelombang bunyi dalam teknologi.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Gelombang bunyi
2. Cepat rambat bunyi
3. Frekuensi bunyi
4. Panjang gelombang

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

- | | |
|--|-------------------------|
| 1. Cepat rambat gelombang bunyi | 6. Pipa organa |
| 2. Gelombang harmonik bunyi | 7. Pelayangan gelombang |
| 3. Energi dan intensitas gelombang bunyi | 8. Resonansi |
| 4. Taraf intensitas bunyi | 9. Fenomena bunyi |
| 5. Efek Doppler | |

Kalian telah mempelajari gelombang pada tali. Gelombang pada tali hanyalah salah satu dari banyak gelombang yang dikelompokkan dalam gelombang mekanik. Aplikasi gelombang tali yang bisa kalian hayati adalah gelombang tali dengan dua ujung tetap pada gitar. Dari tali gitar yang dipetik, akan dihasilkan bunyi. Kalian dapat

mendengarkan bunyi gitar tersebut karena ada medium udara yang merambatkan bunyi. Tetapi apa yang terjadi bila gitar dipetik di dalam ruang yang hampa?

Gelombang bunyi adalah contoh yang baik untuk menggambarkan gelombang longitudinal. Kecepatan menjalar dari gelombang bunyi tergantung pada medium (gas, padat atau cair). Gelombang bunyi yang menjalar lewat medium akan menggetarkan partikel-partikel medium yang dilewatinya, sehingga menghasilkan perubahan kerapatan dan tekanan sepanjang arah gerakan gelombang.

Simpangan akibat gelombang bunyi mencakup simpangan molekul secara individual dari posisi kesetimbangan. Akibatnya, terjadi deretan tekanan rendah dan tinggi yang disebut sebagai perenggangan (tekanan rendah) dan pemampatan (tekanan tinggi). Jika sumber gelombang bunyi seperti pada *loudspeaker* atau difragma bergetar secara sinusoidal, maka variasi tekanan yang terjadi juga bersifat sinusoidal. Oleh sebab itu, kalian akan diajak untuk mendeskripsikan gelombang harmonik bunyi seperti yang terjadi pada gelombang harmonik tali.

Ada tiga kategori gelombang longitudinal mekanik yang didasarkan pada perbedaan frekuensi:

1. Gelombang audio

Gelombang ini merupakan gelombang bunyi yang terletak pada sensitivitas pendengaran manusia yang berkisar antara 20 Hz sampai 20.000 Hz. Daerah frekuensi ini dihasilkan dari peralatan musik, suara manusia dan *loudspeaker*.

2. Gelombang infrasonik

Gelombang infrasonik adalah gelombang longitudinal dengan frekuensi di bawah daerah audio. Gelombang yang terjadi pada gempa bumi merupakan contoh jenis gelombang infrasonik. Gelombang memiliki frekuensi di bawah 20 Hz.

3. Gelombang ultrasonik

Gelombang ultrasonik adalah gelombang longitudinal dengan frekuensi di atas daerah gelombang audio. Gelombang ini memiliki frekuensi di atas 20.000 Hz. Benda sejenis kristal kuarsa (*quartz*) dapat bergetar pada daerah ini dan banyak digunakan pada sistem elektronik.

Transduser adalah peralatan yang dapat mengubah penyaluran tenaga dari satu bentuk ke bentuk yang lain. *Transduser* dapat menghasilkan gelombang ultrasonik yang sering digunakan untuk navigasi bawah laut dan konstruksi untuk mengetahui keretakan. *Loudspeaker* dan kristal kuarsa adalah contoh transduser bunyi.

A. Cepat Rambat Gelombang Bunyi

Bunyi sebagai gelombang longitudinal membutuhkan zat perantara untuk sampai ke telinga kita. Banyak faktor yang mempengaruhi kecepatan bunyi, di antaranya adalah medium dan suhu lingkungan. Kenaikan suhu akan menaikkan kecepatan gerakan molekul-molekul gas dan memungkinkan terjadinya tumbukan satu sama lainnya (ingat teori kinetik gas!). Akibatnya, rambatan energi yang ditransmisikan lebih cepat. Jadi, kecepatan bunyi akan naik seiring dengan kenaikan suhu dalam gas.

Di udara pada temperatur 0°C dan tekanan 1 atm, kecepatan bunyi adalah 331 m/s. Akan tetapi kecepatan bunyi akan bertambah sebesar 0,6 m/s untuk setiap derajat celsius pertambahan temperatur. Secara matematis dapat dituliskan dalam persamaan,

$$v = (331 + 0,6T_c) \text{ m/s}$$

di mana T_c adalah suhu udara dalam derajat celsius.

B. Gelombang Bunyi dalam Gas

Gelombang bunyi dalam gas dikarenakan adanya variasi tekanan dan kerapatan. Oleh karena itu, kecepatan bunyi dalam gas tergantung pada tekanan (P), kerapatan gas (ρ), suhu (T) dan komposisi jenis gasnya. Karena bunyi hanya disebabkan oleh pergerakan gelombang dalam suatu ruangan, maka kita dapat memperkirakan bahwa seluruh massa jenis gas tersebut ikut menentukan besarnya kecepatan bunyi. Struktur molekul mempunyai pengaruh yang sangat kecil, sehingga dapat diabaikan. Sebagai ganti untuk pengertian massa secara individual, kita perkenalkan ke pengertian mole dari suatu gas atau berat molekul (M).

Empat parameter seperti P , ρ , T dan M pada dasarnya mempunyai saling ketergantungan satu sama lain. Untuk gas ideal,

$$PV = RT \quad (2.1)$$

di mana V adalah volume untuk satu mol gas dan $R = 8,31 \times 10^3 \text{ J/kg.mol.K}$, adalah konstanta gas umum. Karena kerapatan didefinisikan sebagai massa/volume, maka kita dapat menuliskan persamaan,

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (2.2)$$

Kombinasi persamaan 2.1 dan 2.2,

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{M} \quad (2.3)$$

Dari kelima parameter yang mempengaruhi kecepatan bunyi di udara dapat dikombinasikan menjadi dimensi kecepatan bunyi, di mana:

v = cepat rambat bunyi dalam gas (m/s)

R = tetapan gas umum ($8,31 \times 10^3 \text{ J.mol}^{-1} \times \text{K}^{-1}$)

γ = tetapan Laplace ($\frac{c_p}{c_v} = \frac{\text{panas jenis gas pada tekanan tetap}}{\text{panas jenis gas pada volume tetap}}$)

T = suhu mutlak gas (K)

M = massa gas tiap mol (kgmol^{-1})

Oleh karena itu, persamaan dari kelima variabel di atas bisa dituliskan,

$$v = \text{konstanta} \sqrt{\frac{P}{\rho}} = \text{konstanta} \sqrt{\frac{RT}{M}} \quad (2.4)$$

Nilai konstanta (γ) dapat dimasukkan ke persamaan 2.4,

$$v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (2.5)$$

di mana γ adalah bilangan murni dan tidak jauh dari satu. Nilai γ tidak sama untuk semua gas. Misal, untuk jenis gas yang terdiri dari molekul tunggal, yaitu He, Ne, Ar, K, Xe mempunyai nilai

$\gamma \approx \frac{5}{3} = 1,667$. Untuk molekul diatomik, misalkan N_2 , O_2 mempunyai nilai $\gamma \approx 1,40$. Untuk molekul yang lebih kompleks seperti CH_4 dan C_2H_4 memiliki nilai $1,15 < \gamma < 1,35$.

Contoh Soal 2.1

Cepat rambat bunyi di udara pada suhu 20°C adalah 343 m/s . Hitung cepat rambat bunyi di udara pada suhu 75°C !

Penyelesaian:

Berdasarkan data yang dapat diperoleh dari soal, maka

Diketahui:

$$v_{20} = 343\text{ m/s}$$

Ditanya:

Kecepatan bunyi pada suhu 75°C (v_{75})?

Jawab:

Berdasarkan persamaan 2.6, kecepatan berbanding lurus dengan akar suhu gas,

$$v_1 : v_2 = \sqrt{T_1} : \sqrt{T_2}, \text{ (Harga } \gamma, R \text{ dan } M \text{ sama, karena satu jenis gas).}$$

$$\frac{(343\text{ m/s})}{v_2} = \frac{\sqrt{293\text{ K}}}{\sqrt{348\text{ K}}}$$

$$v_2 = \frac{(343\text{ m/s})(\sqrt{348\text{ K}})}{\sqrt{293\text{ K}}} = \frac{6398,58}{17,12}\text{ m/s} = 374\text{ m/s}$$

C. Cepat Rambat Bunyi pada Batang

Jika kita memukul salah satu ujung batang (benda padat) dengan alat pemukul seperti martil, maka batang tersebut mengalami perubahan energi (deformasi) secara elastis pada ujung batang tersebut. Gangguan ini akan menjalar melalui batang dengan kecepatan tertentu. Karena adanya deformasi setempat pada batang, maka kecepatan bunyi tergantung pada modulus Young (Y). Kecepatan bunyi juga dipengaruhi oleh kerapatan benda dan penampang lintang atau diameter benda.

Pada kelas XI kalian telah mempelajari tentang Modulus Young, dirumuskan

$$Y \frac{\Delta l}{l} = \frac{F}{A} \rightarrow Y = \frac{F l}{A \Delta l} \quad (2.6)$$

Dari persamaan 2.6, satuan untuk $Y = \text{kg.m.s}^{-2}.\text{m}^{-2} = \text{kg.m.s}^{-2}$. Sedang kerapatan dan luas mempunyai satuan kg/m^3 dan m^2 . Dari satuan yang kita ketahui, maka dapat disimpulkan bahwa kecepatan bunyi adalah

$$v_0 = \text{konstanta} \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (2.7)$$

di mana konstanta pada persamaan 2.7 adalah suatu bilangan yang besarnya sama untuk semua benda dan nilainya sama dengan satu. Oleh sebab itu, persamaan 2.7 dapat ditulis kembali,

$$v_0 = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} \quad (2.8)$$

Persamaan 2.8 menunjukkan bahwa kecepatan bunyi yang merambat di udara berbanding lurus dari akar modulus Young dan berbanding terbalik dengan akar kerapatannya. Suatu hal yang menarik pada persamaan 2.8 bahwa kecepatan bunyi pada batang atau benda padat tidak tergantung pada luas permukaan dan juga tidak tergantung pada bentuk bendanya.

Serupa dengan persamaan 2.8, jika mediumnya mempunyai modulus Bulk (B) dan kerapatannya adalah ρ , maka kecepatan bunyi dapat ditulis,

$$v_0 = \sqrt{\frac{B}{\rho}} \quad (2.9)$$

di mana B adalah modulus Bulk yang didefinisikan sebagai perbandingan perubahan tekanan ΔP terhadap hasil perbandingan perubahan volume terhadap volume semula. Secara matematis dapat dituliskan,

$$B = - \frac{\Delta P}{\Delta V/V} \quad (2.10)$$

Nilai B selalu positif. Hal ini dikarenakan kenaikan tekanan selalu diikuti oleh penurunan volume, sehingga perbandingan $\Delta P/\Delta V$ negatif.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, kerjakanlah tugas berikut!

Tugas 2.1

Bandingkan persamaan 2.8 dan persamaan $v_0 = \sqrt{\frac{F}{\mu}}$ yaitu kecepatan rambat pada tali. Berilah komentar menurut bahasa kalian!

Contoh Soal 2.2

1. Tentukan kecepatan bunyi pada batang logam tembaga! Nilai $Y_{\text{Cu}} = 11 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ dan $\rho_{\text{Cu}} = 8,92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$Y_{\text{Cu}} = 11 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$$

$$\rho_{\text{Cu}} = 8,92 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Ditanya:

Kecepatan rambat bunyi dalam batang tembaga?

Jawab:

Berdasarkan persamaan 2.8, maka kecepatan rambat bunyi pada batang tembaga,

$$v_0 = \sqrt{\frac{Y}{\rho}} = \sqrt{\frac{(11 \times 10^{10}) \text{ N/m}^2}{(8,92 \times 10^3) \text{ kg/m}^3}} = \sqrt{\frac{11 \times 10^7}{8,92}} \text{ m/s} = 3511 \text{ m/s}$$

Ini adalah tipe dari kecepatan bunyi di benda padat yang mana mempunyai nilai lebih besar daripada kecepatan bunyi pada zat cair dan gas. Hal ini dikarenakan letak molekul zat padat lebih dekat daripada zat cair atau gas sehingga rambatan energi bunyi melalui medium lebih cepat.

2. Tentukan kecepatan rambat bunyi dalam air yang mempunyai modulus Bulk $2,1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ dan kerapatannya 10^3 kg/m^3 !

Penyelesaian:**Diketahui:**

$$B_{\text{air}} = 2,1 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

$$\rho_{\text{air}} = 10^3 \text{ kg/m}^3$$

Ditanya:

Kecepatan rambat bunyi dalam air (v_{air})?

Jawab:

Berdasarkan persamaan 2.9,

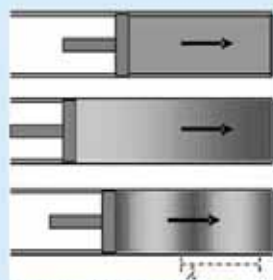
$$v_0 = \sqrt{\frac{B}{\rho}} = \sqrt{\frac{2,1 \times 10^9 \text{ N/m}^2}{10^3 \text{ kg/m}^3}} = 1500 \text{ m/s}$$

Hasil kecepatan rambat dalam air lebih kecil dari kecepatan rambat dalam batang tembaga.

D. Gelombang Harmonik Bunyi

Jika sumber gelombang longitudinal berupa gelombang harmonik, seperti getaran diafragma, osilasi gerak harmonik sederhana akan menghasilkan gelombang harmonik juga. Gelombang harmonik bunyi dalam satu dimensi dapat dihasilkan dari tabung sempit berisi gas dengan cara menggerakkan piston pada salah satu ujungnya, lihat gambar 2.1! Daerah yang gelap menunjukkan gas terkompresi (termampatkan). Kerapatan dan tekanannya mempunyai nilai setimbang. Gas termampatkan akibat piston yang digerakkan ke arah dalam tabung. Daerah yang termampatkan disebut kondensasi (*condensation*). Pergerakan piston ini memberikan pulsa gelombang dan secara kontinyu menekan lapisan di depannya. Jika piston ditarik keluar dari tabung, gas didepannya merenggang dan kerapatan maupun tekanan dalam daerah ini mengalami penurunan nilai di bawah titik kesetimbangan.

Daerah kondensasi yang mengalami penurunan nilai kerapatan dan tekanan disebut daerah perenggangan (*rarefactions*). Daerah ini menjalar sepanjang



Gambar 2.1 Penjalaran gelombang

tabung yang diikuti oleh daerah pemampatan. Kedua daerah tersebut menjalar dengan kecepatan sama dengan kecepatan bunyi dalam medium, kira-kira 343 m/s dalam suhu udara 20°C.

Jika piston mengalami pergerakan bolak-balik, maka akan terbentuk daerah pemampatan dan perenggangan secara kontinyu. Jarak antara dua pemampatan yang terdekat atau jarak dari dua perenggangan yang terdekat sama dengan satu panjang gelombang. Daerah pemampatan dan perenggangan bergerak sepanjang medium dalam tabung dengan gerak harmonik sederhana yang sejajar terhadap arah gelombang. Jika $y(x,t)$ adalah perpindahan atau simpangan dalam volume kecil, diukur dari posisi kesetimbangan, kita dapat menjelaskan pergeseran harmonik sebagai fungsi,

$$y(x,t) = y_m \cos(kx - \omega t) \quad (2.11)$$

di mana y_m adalah simpangan maksimum dari titik kesetimbangan, k adalah bilangan gelombang dan ω adalah frekuensi sudut piston. Variasi tekanan gas dari nilai kesetimbangannya juga harmonik, yang dituliskan dalam bentuk persamaan,

$$\Delta P = \Delta P_m \sin(kx - \omega t) \quad (2.12)$$

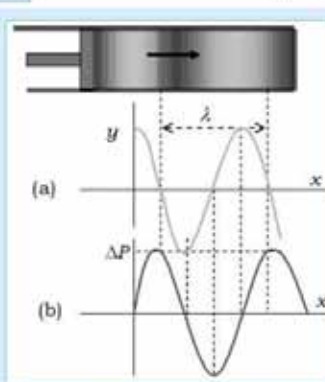
di mana ΔP_m adalah amplitudo tekanan, yaitu perubahan nilai tekanan maksimum dari nilai kesetimbangan. Besarnya amplitudo tekanan berbanding lurus terhadap simpangan maksimum y_m dan diberikan dalam bentuk persamaan,

$$\Delta P = \rho v \omega y_m \quad (2.13)$$

di mana ωy_m adalah kecepatan longitudinal maksimum pada medium.

Jadi, berdasarkan persamaan 2.11 dan 2.12, gelombang bunyi dapat dilihat sebagai gelombang simpangan atau gelombang tekanan.

Perhatikan pada gambar 2.2 yang menunjukkan perbedaan fase 90° antara simpangan gelombang terhadap tekanan gelombang. Tekanan gelombang pada posisi puncak dan simpangan gelombang pada posisi nol, begitu sebaliknya



Gambar 2.2 (a) simpangan amplitudo terhadap posisi, (b) tekanan amplitudo terhadap posisi

jika simpangan maksimum, maka amplitudo tekanan nol. Hal ini berkaitan dengan berbandinglurusnya tekanan terhadap kerapatan, sehingga variasi kerapatan berkaitan dengan apa yang dijelaskan dalam persamaan 2.12.

Untuk meningkatkan **kemampuan vokasional** kalian, lakukanlah kegiatan berikut

Kegiatan 2.1

Selain dengan percobaan pipa Kundt, kecepatan merambat gelombang bunyi di udara dapat ditentukan dengan memanfaatkan peristiwa resonansi. Untuk itu, marilah kita lakukan kegiatan sebagai berikut:

Tujuan:

Siswa mampu melakukan percobaan dan menentukan kecepatan merambat gelombang bunyi di dalam udara dengan resonansi.

Konsep:

1. Resonansi pada kolom udara terjadi jika panjang kolom udara itu $= \frac{1}{4}\lambda, \frac{3}{4}\lambda, \dots$ (λ = panjang gelombang sumber bunyi yang menimbulkannya).
2. Dengan menggunakan rumus: $v = \lambda f$, dapat dihitung kecepatan merambat gelombang bunyi (v), jika frekuensi sumber bunyi (f) diketahui, sedangkan λ dapat diukur melalui percobaan.

Saran penyajian:

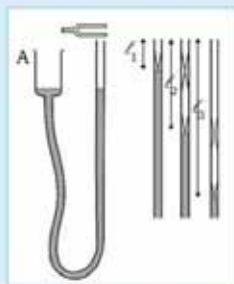
Garputala G yang mempunyai frekuensi f digetarkan di atas tabung resonansi sehingga akan menimbulkan peristiwa resonansi pada rongga udara. Ditandai dengan terdengarnya dengung nada yang kuat.

Alat dan bahan:

1. Satu perangkat alat resonansi,
2. Satu buah garputala yang sudah diketahui frekuensinya,
3. Statif berkaki panjang, lengkap dengan penjepitnya,
4. Air secukupnya.

Persiapan percobaan:

Susunlah alat-alat seperti pada gambar berikut.



Gambar 2.3 Peristiwa resonansi bunyi

Langkah-langkah percobaan:

1. Tabung A diisi air secukupnya.
2. Getarkan garputala dan segera tempatkan hampir menempel di bibir tabung A!
3. Turunkan ketinggian air di tabung A perlahan-lahan sampai terdengar dengung nada yang kuat.
4. Ukur panjang kolom udara (ℓ_1), saat terjadi resonansi yang pertama.
5. Ulangi kegiatan tersebut di atas untuk mendapatkan resonansi yang kedua, misalkan panjang kolom udara sekarang ℓ_2 .

Hasil pengamatan:

Salinlah kolom data berikut ini dan masukkan hasil pengamatan kalian!

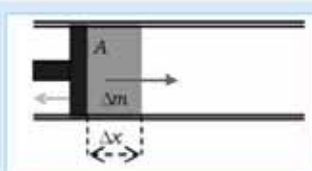
No.	f (Hz)	ℓ_1 (m)	ℓ_2 (m)	$\frac{1}{2}\lambda = \ell_2 - \ell_1$	λ (m)	$v = \lambda \cdot f$ (m/s)
1.

Kesimpulan:

Kecepatan merambat bunyi pada saat itu adalah

E. Energi dan Intensitas Gelombang Bunyi

Ketika kalian mempelajari gelombang pada tali, terjadi penyaluran energi yang merambat dari satu titik ke titik berikutnya. Konsep yang sama terjadi pada gelombang bunyi. Perhatikan lapisan udara dengan massa Δm dan lebar Δx di depan osilasi piston dengan frekuensi sudut ω , seperti gambar 2.4. Piston mengirim energi ke lapisan udara. Energi total rata-rata dari massa Δm sama dengan energi kinetik maksimumnya. Oleh karena itu, energi rata-rata dari gerakan lapisan gas adalah,



Gambar 2.4 Piston berosilasi mentransfer energi ke gas dalam tabung, menyebabkan lebar lapisan Δx dan massa Δm untuk berosilasi dengan amplitudo y_m

$$\Delta E = \frac{1}{2} \Delta m (\omega y_m)^2 = \frac{1}{2} (\rho A \Delta x) (\omega y_m)^2 \quad (2.14)$$

di mana $(A \Delta x)$ adalah volume lapisan. Persamaan 2.14 dapat dituliskan dalam bentuk,

$$\Delta E = \frac{1}{2} \Delta m (\omega y_m)^2 = \frac{1}{2} (\rho \Delta V) (\omega y_m)^2 \quad (2.15)$$

di mana $\Delta V = A \Delta x$ adalah volume lapisan udara.

Energi per satuan waktu adalah daya (P_w), sehingga persamaan 2.14 dapat ditulis dalam bentuk,

$$\begin{aligned} \frac{\Delta E}{\Delta t} &= P_w = \frac{1}{2} \left(\rho A \frac{\Delta x}{\Delta t} \right) (\omega y_m)^2 \\ \text{Atau} \\ \frac{\Delta E}{\Delta t} &= \frac{1}{2} (\rho A v) (\omega y_m)^2 \end{aligned} \quad (2.16)$$

di mana v adalah kecepatan. $v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ arah ke kanan.

Daya per satuan luas disebut intensitas (I), sehingga persamaan 2.16 dapat ditulis menjadi,

$$I = \frac{P_w}{A} = \frac{1}{2} \rho (\omega y_m)^2 v \quad (2.17)$$

Persamaan 2.17 menunjukkan bahwa intensitas gelombang harmonik bunyi berbanding lurus terhadap kuadrat simpangan amplitudo dan kuadrat frekuensi sudut. Hal ini serupa dengan gelombang harmonik pada tali. Substitusi persamaan 2.17 ke persamaan 2.13 mendapatkan persamaan,

$$I = \frac{\Delta P_m^2}{2\rho v} \quad (2.18)$$

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan sosial** kalian, lakukanlah kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Berdasarkan persamaan 2.17 dan 2.18, apa yang bisa kalian simpulkan mengenai hubungan antara intensitas terhadap kecepatan bunyi dan kerapatan gas?

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut ini!

Contoh Soal 2.3

Seseorang masih mampu mendeteksi bunyi yang sangat lemah pada frekuensi 1000 Hz dengan intensitas 10^{-12} W/m^2 (disebut batas ambang pendengaran) tetapi sebaliknya, pada bunyi yang sangat keras dengan harga intensitas 1 W/m^2 (batas ambang rasa sakit dalam pendengaran) orang tersebut sudah tidak mampu mendengar lagi. Tentukan amplitudo tekanan dan simpangan maksimum jika kerapatan udara $1,20 \text{ kg/m}^3$ dan kecepatan bunyi 343 m/s !

Penyelesaian:

Berdasarkan analisa soal didapatkan data sebagai berikut:

Diketahui:

$$f = 1000 \text{ Hz}$$

$$I_0 = 10^{-12} \text{ W/m}^2$$

$$I_g = 1 \text{ W/m}^2$$

$$\rho_u = 1,20 \text{ kg/m}^3$$

$$v = 343 \text{ m/s}$$

Ditanya:

- a. ΔP ?
 b. y_{mak} ?

Jawab:

Berdasarkan persamaan 2.18

$$\begin{aligned} \text{a. } I &= \frac{\Delta P_m^2}{2\rho v} \rightarrow \Delta P_m \\ &= (2I\rho v)^{1/2} = \{2(10^{-12} \text{ W/m}^2)(1,20 \text{ kg/m}^3)(343 \text{ m/s})\} \\ I &= 2,87 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2 \end{aligned}$$

- b. Untuk menentukan simpangan maksimum, gunakan pers.(2.13)

$$\Delta P = \rho v \omega y_m \rightarrow y_m = \frac{\Delta P}{\rho v \omega}$$

Untuk mendapatkan harga ω , kita gunakan hubungan $\omega = 2\pi f$, sehingga

$$\begin{aligned} y_m &= \frac{\Delta P}{\rho v 2\pi f} \\ &= \frac{2,87 \times 10^{-5} \text{ N/m}^2}{(1,20 \text{ kg/m}^3)(343 \text{ m/s})(2)(3,14)(10^3 \text{ Hz})} = 1,11 \times 10^{-11} \text{ m} \end{aligned}$$

Persamaan 2.17 memberikan pengertian daya persatuan luas yang disebut intensitas, I . Secara umum dapat dikatakan bahwa intensitas gelombang bunyi adalah jumlah energi gelombang bunyi tiap satuan waktu yang menembus bidang tegak lurus tiap satuan luas. Satuan dari intensitas adalah W/m^2 .

Jika luas bidang A adalah luas permukaan bola ($A = 4\pi R^2$) lihat gambar 2.5, maka persamaan 2.17 dapat ditulis kembali,

$$I = \frac{P_w}{4\pi R^2} \quad (2.19)$$

Aplikasi persamaan 2.19 dapat dilihat pada gambar 2.5, dimana bunyi merambat dari sumbernya (S) menjalar sejauh R_1 , dalam waktu tertentu sampai di R_2 .

Pengaruh jarak terhadap nilai intensitas bunyi (berdasarkan persamaan 2.19 di titik R_1 adalah

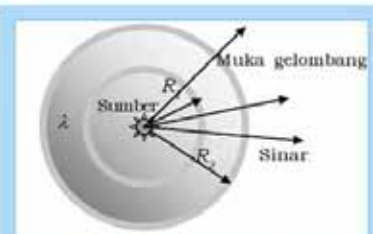
$$I_1 = \frac{P_w}{A_1} = \frac{P_w}{4\pi R_1^2}$$

Intensitas bunyi di titik R_2 ,

$$I_2 = \frac{P}{A_2} = \frac{P}{4\pi R_2^2}$$

Perbandingan intensitas bunyi di titik R_1 dan titik R_2

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2^2}{R_1^2} \quad (2.20)$$



Gambar 2.5 Rambatan energi gelombang persatuan luas sebagai fungsi jarak

F. Taraf Intensitas Bunyi (Sound Level)

Tidak semua frekuensi gelombang bunyi dapat didengar oleh telinga normal. Dengan keterbatasan frekuensi yang bisa kita dengar, maka secara langsung ada keterbatasan pula pada energi dan intensitas bunyi yang bisa didengar.

Intensitas minimum yang masih dapat didengar untuk rata-rata manusia adalah sekitar $10^{-12} \text{ watt.m}^{-2}$. Harga ini disebut harga ambang pendengaran, I_0 . Jadi, pendengaran kita tidak cukup dibatasi oleh besar-kecilnya frekuensi, namun juga intensitasnya. Kenaikan intensitas menyebabkan bunyi semakin keras. Pada intensitas sekitar 1 watt/m^2 , bunyi yang kita dengar sudah tidak nyaman lagi dan mungkin menyebabkan rasa sakit pada telinga. Intensitas pada harga 1 watt/m^2 , I_p , disebut harga ambang rasa sakit atau disebut juga harga ambang perasaan.

Perhatikan bahwa harga ambang rasa sakit dan ambang pendengaran berbeda dengan faktor 10^{12} ,

$$\frac{I_p}{I_0} = \frac{1,0 \text{ W.m}^{-2}}{10^{-2} \text{ W.m}^{-2}} = 10^{12} \quad (2.21)$$

Jadi, intensitas pada harga ambang rasa sakit adalah 10^{12} kali harga ambang pendengaran.

Karena selang intensitas bunyi yang dapat merangsang pendengaran manusia itu besar, yaitu dari 10^{-12} watt.m⁻² sampai dengan 1 watt.m⁻², maka digunakan skala logaritma yang disebut taraf intensitas. Taraf intensitas dapat diberi lambang β dan didefinisikan sebagai logaritma perbandingan antara intensitas bunyi, I , dengan harga ambang pendengaran, I_0 .

$$\beta = 10 \log \frac{I}{I_0} \quad (2.22)$$

di mana β adalah taraf intensitas bunyi yang dinyatakan dalam satuan bell atau desibel, I adalah intensitas bunyi, dinyatakan dalam watt.m⁻², I_0 adalah ambang pendengaran 10^{-12} watt.m⁻².

Dalam satuan bell, nilai β terlalu kecil, oleh sebab itu dalam praktek digunakan satuan desibel di mana 1 bell = 10 desibel. Berdasarkan persamaan 2.22, harga ambang rasa sakit adalah

$$\beta = 10 \log \frac{1 \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 120 \text{ dB}$$

Sebaliknya, harga ambang pendengaran adalah

$$\beta = 10 \log \frac{1 \text{ W/m}^2}{1 \text{ W/m}^2} = 0 \text{ dB}$$

Sumber bunyi yang menghasilkan taraf intensitas tinggi akan menyebabkan kerusakan serius pada telinga. Oleh sebab itu, apapun alasannya, taraf intensitas melebihi 90 dB diharuskan memakai sumbat telinga. Bukti-bukti menunjukkan bahwa taraf intensitas melebihi 90 dB tergolong polusi suara yang memberikan kontribusi adanya faktor tekanan darah tinggi, kegelisahan, dan rasa takut (*nervousness*).

Tabel 2.1 menunjukkan harga taraf intensitas bunyi dari berbagai sumber bunyi. Alat yang digunakan untuk mengukur taraf intensitas adalah *Sound Level Meter*.

Brilian

Kalian telah mempelajari apa itu gelombang bunyi dan bagaimana cara perambatannya. Analisislah bagian tubuhmu yang berkaitan bunyi. Bisa sebagai sumber bunyi, proses pengeluaran bunyi serta penerimaan gelombang bunyi. Kalau dibutuhkan, buatlah bagan atau gambar yang dapat memvisualisasikan analisismu.

Tabel 2.1 Harga Taraf Intensitas dari Berbagai Sumber Bunyi

Sumber Bunyi	β (dB)
Pesawat jet terdekat	150
Mesin tembakan	130
Sirene atau Konser Rock	120
Lalu lintas ramai	80
Vacuum cleaner	70
Percakapan biasa	50
Nyamuk yang berdengung	40
Suara bisik-bisik	30
Daun berguguran	10
Harga ambang pendengaran	0

Sumber: *Physics for Scientist and Engineers*, Raymond Serway.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 2.4

- Pada jarak 15 m dari sumber bunyi, intensitas gelombang bunyi adalah $10^{-6} \text{ watt.m}^{-2}$. Hitung intensitas gelombang bunyi itu pada jarak 75 m!

Penyelesaian:

Diketahui:

$$R_1 = 15 \text{ m}$$

$$I_1 = 10^{-6} \text{ W/m}^2$$

$$R_2 = 75 \text{ m}$$

Ditanya:

Intensitas pada jarak 75 m (I_2)!

Jawab:

Berdasarkan persamaan 2.20,

$$\begin{aligned}
 I_2 &= \frac{I_1 R_1^2}{R_2^2} = \frac{10^{-6} \text{ W/m}^2 (15\text{m})^2}{(75\text{m})^2} \\
 &= \frac{225 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2}{5625} = 0,04 \times 10^{-6} \text{ W/m}^2
 \end{aligned}$$

2. Pada jarak 1 m dari sumber bunyi, intensitas bunyinya adalah 10^{-8} W/m^2 . Tentukan:
- Taraf intensitas bunyi di tempat itu!
 - Intensitas bunyi pada jarak 20 m dari sumber bunyi!
 - Taraf intensitas bunyi pada jarak 20 m!

Penyelesaian:

Diketahui:

$$R_1 = 1 \text{ m}$$

$$I_1 = 10^{-8} \text{ W/m}^2$$

Ditanya:

- β pada jarak 1 m?
- Intensitas pada $R_2 = 20 \text{ m}$?
- β pada jarak 1 m?

Jawab:

$$\text{a. } \beta = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{10^{-8} \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} = 40 \text{ dB}$$

$$\text{b. } I_2 = \frac{I_1 R_1^2}{R_2^2} = \frac{10^{-8} \text{ W/m}^2 (1 \text{ m})^2}{(20 \text{ m})^2} = 0,25 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2$$

$$\begin{aligned} \text{c. } \beta &= 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{0,25 \times 10^{-10} \text{ W/m}^2}{10^{-12} \text{ W/m}^2} \\ &= 10 \log 0,25 \times 10^2 \text{ dB} = 14 \text{ dB} \end{aligned}$$

G. Efek Doppler

Kalian pernah mendengarkan bunyi sirene mobil pemadam kebakaran, dimana suara akan terdengar semakin keras jika mobil mendekati kalian dan semakin lemah jika mobil semakin menjauh. Peristiwa seperti ini akan dianalisis melalui konsep efek Doppler. Secara umum, efek Doppler akan menganalisis hubungan antara pergerakan sumber bunyi dengan pergerakan pendengar. Jika sumber bunyi dan pendengar saling mendekati, maka frekuensi yang didengar oleh pendengar lebih tinggi daripada frekuensi sumber bunyi. Sebaliknya, bila sumber bunyi dan pendengar saling

menjauh, maka frekuensi yang didengar oleh pendengar lebih rendah daripada frekuensi sumber. Walaupun efek Doppler secara umum banyak dialami pada gelombang bunyi, namun fenomena ini merupakan hal yang biasa untuk semua gelombang harmonik. Pengaruh dari efek Doppler banyak digunakan pada sistem kepolisian untuk penggunaan sistem radar dalam mengikuti pergerakan kendaraan motor. Dalam dunia astronomi atau astrofisika, efek Doppler ikut memperkuat teori Big Bang (dentuman sangat dasat), yaitu bahwa alam semesta selalu mengembang sehingga dapat digunakan untuk menentukan pergerakan galaksi, bintang atau benda-benda langit. Jika benda langit yang menjadi perhatian menjauh dari pengamat, maka terjadi kenaikan panjang gelombang. Sebaliknya, jika benda-benda langit mendekat dari pengamat, maka terjadi penurunan panjang gelombang.

Seorang berjalan dengan kecepatan v_o mendekati sumber bunyi yang diam ($v_s=0$). Frekuensi sumber bunyi adalah f , panjang gelombang λ , dan kecepatan rambat bunyi v . Jika seorang pendengar dalam posisi diam, maka orang tersebut akan mendengarkan bunyi dengan frekuensi f , artinya bila $v_o = 0$ dan $v_s = 0$, frekuensi yang didengar sama dengan frekuensi sumber bunyi. Namun bila pendengar bergerak ke arah sumber, maka kecepatan gelombang bunyi relatif terhadap pendengar adalah $v' = v + v_o$ tetapi panjang gelombangnya tidak berubah. Oleh sebab itu, frekuensi yang didengar oleh pendengar bertambah, diberikan oleh persamaan,

$$f' = \frac{v + v_o}{\lambda} \quad (2.23)$$

Namun karena $\lambda = \frac{v}{f}$, maka persamaan 2.23 menjadi

$$f' = f \left(\frac{v + v_o}{v} \right) \quad (2.24)$$

Sebaliknya, jika pendengar menjauh dari sumber, maka kecepatan relatifnya adalah $v' = v - v_o$ yang mana frekuensi yang didengar lebih rendah daripada frekuensi sumber. Analog dengan persamaan 2.24, maka didapatkan persamaan

$$f' = f \left(\frac{v - v_o}{v} \right) \quad (2.25)$$

Jika sumber bunyi mendekati pendengar yang diam, maka terjadi perubahan panjang gelombang. Panjang gelombang yang (λ') daripada panjang gelombang sumber (λ). Panjang gelombang yang didengar adalah, f ,

$$\lambda' = \lambda - \Delta\lambda = \lambda - v_s / f$$

di mana perubahan panjang gelombang ($\Delta\lambda$) menunjukkan bahwa setiap getaran dalam satu periode sumber bergerak dengan jarak $v_s T = v_s / f$.

Karena $\lambda = \frac{v}{f}$, maka frekuensi yang didengar oleh pendengar adalah,

$$f' = \frac{v}{\lambda'} = \frac{v}{\lambda - v_s / f}$$

Dengan sedikit perhitungan secara aljabar, kalian bisa menunjukkan bentuk persamaan yang lebih sederhana, yaitu

$$f' = f \left(\frac{1}{1 - v_s / v} \right) \quad (2.26)$$

Ini menunjukkan bahwa frekuensi yang didengar naik jika sumber mendekati pendengar. Dengan cara yang sama jika sumber menjauhi pendengar maka didapatkan bahwa frekuensi yang didengar oleh pendengar menurun dan diberikan oleh persamaan,

$$f' = f \left(\frac{1}{1 + v_s / v} \right) \quad (2.27)$$

Secara umum dari persamaan 2.24 sampai 2.27 dapat dituliskan,

$$f' = f \left(\frac{v \pm v_o}{v \mp v_s} \right) \quad (2.28)$$

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, kerjakanlah tugas berikut!

Tugas 2.2

Buktikan persamaan 2.28 dengan mengkombinasi persamaan 2.24–2.27 dan terangkan apa makna persamaan 2.28 secara fisis!

Contoh Soal 2.5

Sebuah mobil pemadam kebakaran bergerak dengan kecepatan 35 m/s. Sumber bunyi (sirine) mengeluarkan bunyi dengan frekuensi 450 Hz. Berapa frekuensi yang didengar penumpang mobil sedan yang bergerak dengan kecepatan 25 m/s dari arah yang berlawanan? Pertama penumpang mobil sedan mendekati mobil pemadam kebakaran dan selanjutnya menjauhi mobil pemadam kebakaran.

Penyelesaian:

Berdasarkan data yang diperoleh dari soal, maka

Diketahui:

$$v_s = 35 \text{ m/s}$$

$$f_s = 450 \text{ Hz}$$

$$v_0 = 25 \text{ m/s}$$

$$v = 343 \text{ m/s}$$

Ditanya:

- frekuensi pendengar saat mendekati bunyi sirine dari mobil pemadam kebakaran?
- frekuensi pendengar setelah menjauhi bunyi sirene?

Jawab:

- Dalam keadaan seperti ini, kalian dapat menggunakan bentuk persamaan 2.28. Sumber bunyi dan pendengar saling mendekat, sehingga

$$f' = f \left(\frac{v + v_0}{v - v_s} \right) = 450 \text{ Hz} \left(\frac{(343 + 25) \text{ m/s}}{(343 - 35) \text{ m/s}} \right) = 538 \text{ Hz}$$

- $$f' = f \left(\frac{v - v_0}{v + v_s} \right) = 450 \text{ Hz} \left(\frac{(343 - 25) \text{ m/s}}{(343 + 35) \text{ m/s}} \right) = 379 \text{ Hz}$$

H. Pipa Organa

Jika kalian bermain gitar atau piano, perbedaan penekanan senar dengan jari tangan akan memberikan bunyi yang berbeda. Begitu pula panjang pendeknya senar yang digunakan akan

berpengaruh pada nada bunyi yang dihasilkan. Sudah dibicarakan mengenai frekuensi dasar ($n = 1$) dan nada atas yang berkaitan dengan fungsi gaya tegangan

$$(f_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{F}{\mu}} , n = 1, 2, 3, \dots)$$

Apakah kalian pernah meniup terompet atau seruling? Jika ditiup dapat memperdengarkan nada rendah maupun nada tinggi, bahkan bagi mereka yang pandai memainkan dapat memperdengarkan suara yang merdu. Coba kalian renungkan, apa yang terjadi pada seruling yang ketika ditiup dapat mengeluarkan bunyi?

Kreasi Fisika

Kalian telah mempelajari tentang pipa organa. Dengan prinsip dasar pipa organa, cobalah kalian buat seruling sendiri dengan menggunakan pipa-pipa tertentu. Bahan pipa bisa bermacam-macam, seperti pipa pralon, bambu atau pipa-pipa yang lain. Buatlah berbagai variasi seruling dengan temanmu. Kalian bisa memvariasikan jenis bahan pipa maupun jarak antar kolom, berkreasilah sesuai dengan kreativitasmu. Diharapkan dengan ini dapat menumbuhkan semangat inovatif dan kreatif kalian.



Akan kita bahas frekuensi bunyi yang diperdengarkan oleh pipa organa. Pipa organa berupa tabung yang berisi kolom udara. Ukuran panjangnya jauh lebih besar dari lebarnya. Ukuran ini memungkinkan terbentuknya gelombang longitudinal berdiri di dalam tabung, sehingga dapat menghasilkan bunyi. Perbedaan fase yang terjadi antara gelombang datang dan gelombang pantul terletak pada perbedaan ujung pipa, yaitu terbuka atau tertutup. Analoginya seperti beda fase yang terjadi pada gelombang transversal, antara gelombang datang dan pantul pada ujung tali, yaitu ujung terikat atau bebas.

Pada ujung pipa udara terbuka, molekul-molekul udara secara penuh mempunyai kebebasan untuk bergerak. Gelombang yang dipantulkan oleh ujung terbuka terhadap udara mendekati sefase dengan gelombang datang jika diameter tabung relatif lebih kecil terhadap panjang gelombang bunyi. Akibatnya, ujung yang terbuka terhadap kolom udara mendekati bentuk puncak/perut (*antinode*) dan terjadinya tekanan yang minimum (*pressure node*).

Pada pipa organa dengan ujung tertutup, identik dengan gelombang transversal pada tali yang terikat, dimana pada ujung yang tertutup gelombang pantul mengalami perubahan fase sebesar 180° terhadap gelombang datang. Sehingga, pada ujung yang tertutup terjadi simpul (*node*) dan berkaitan dengan titik maksimum terhadap tekanan (*pressure antinode*).

Gambar 2.6 menunjukkan dua jenis pipa organa, yaitu pipa organa terbuka yang mana kedua ujungnya terbuka dan pipa organa tertutup yang mana salah satu ujungnya tertutup.

Pada pipa organa terbuka, ada beberapa kemungkinan yang terjadi untuk menciptakan suatu nada, yaitu nada dasar atau nada terendah dan nada-nada atas. Pada nada dasar terbentuk 1 simpul di antara 2 perut, lihat gambar 2.7(a)! Dari gambar 2.7(a), diperlihatkan bahwa di dalam pipa terjadi $(\frac{1}{2})\lambda_1$ sepanjang L . Oleh karena itu,

$$L = \frac{1}{2}\lambda_1 \Rightarrow \lambda_1 = 2L$$

Dengan menerapkan persamaan $f = \frac{v}{\lambda}$ diperoleh:

$$f_1 = \frac{v}{2L}$$

Pada gambar 2.7(b) pipa berikutnya terbentuk nada yang lebih tinggi daripada nada dasar, yaitu terbentuk 2 simpul dan 3 perut. Ini berarti bahwa untuk panjang L terbentuk 1λ . Dikatakan pipa organa memperdengarkan nada atas pertama dengan frekuensi f_2 . Besarnya f_2 dapat diturunkan,

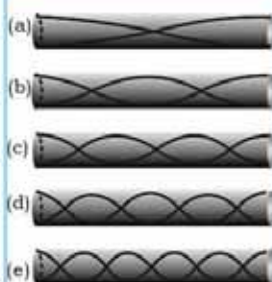
$$L = \lambda_2$$

Identik dengan nada dasar, maka

$$f_2 = \frac{v}{\lambda_2} = \frac{v}{L}$$



Gambar 2.6 Pipa Organa (a) pipa organa terbuka (b) pipa organa tertutup



Gambar 2.7 Pembentukan gelombang pada pipa organa terbuka

Pada gambar 2.7(c), pipa organa yang ketiga menghasilkan bentuk gelombang bunyi dengan nada lebih tinggi daripada f_2 , yaitu terdiri dari 3 simpul dan 4 perut sepanjang L . Pipa organa ini menghasilkan nada atas kedua dengan frekuensi f_3 . Besarnya f_3 adalah

$$L_3 = \frac{3}{2} \lambda_3$$

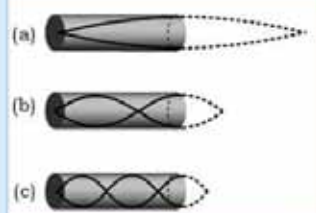
$$f_3 = \frac{3v}{2L}$$

Secara umum dari harga f_1, f_2, f_3 dapat disimpulkan bahwa pipa organa terbuka mempunyai harga frekuensi yang membentuk tangga nada yang serasi atau nada harmonik, dimana nada tingginya merupakan bentuk perkalian dari nada dasar. Secara matematis dapat ditulis

$$f_n = n \frac{v}{2L} = n f_1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (2.29)$$

dan v adalah kecepatan bunyi dalam udara.

Pada pipa organa tertutup terjadi bentuk gelombang seperti pada gambar 2.8.



Gambar 2.8 Pembentukan gelombang pada pipa organa tertutup

Dengan cara dan analisis pada pipa organa terbuka, maka pada pipa organa tertutup dapat kalian lihat bahwa:

- $L = \frac{1}{4} \lambda_1$ sehingga $f_1 = \frac{v}{4L}$
(nada dasar)
- $L = \frac{3}{4} \lambda_3$, sehingga $f_3 = \frac{3v}{4L}$
(nada atas pertama)
- $L = \frac{5}{4} \lambda_5$, sehingga $f_5 = \frac{5v}{4L}$
(nada atas kedua)

Dari harga f_1, f_3, f_5 , secara umum dapat disimpulkan bahwa,

$$f_m = m \frac{v}{4L} = m f_1 \quad (\text{di mana } m = 1, 3, 5, \dots) \quad (2.30)$$

Dari persamaan 2.29 dan 2.30 menunjukkan besarnya frekuensi tergantung pada panjang pipa. Ini penting untuk diperhatikan, khususnya dalam mendesain peralatan sederhana

seperti seruling atau terompet khususnya dalam mendapatkan nada dasar. Diameter pipa organa sebenarnya ikut menentukan frekuensi yang dihasilkan, namun tidak dianalisis lebih lanjut dalam bab ini. Secara prinsip hampir sama dengan semua peralatan musik yang menggunakan tiupan udara (angin). Dari pembahasan di atas, pernapasan manusia digunakan untuk menciptakan gelombang berdiri dalam sebuah tabung terbuka.

Contoh Soal 2.6

Sebuah pipa organa terbuka panjang 25 cm. Pada suhu kamar, kecepatan bunyi saat itu 340 m/s. Berapa perbedaan frekuensi nada dasar dengan frekuensi nada atas pertama?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$L = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$$

$$v = 340 \text{ m/s}$$

Ditanya:

Perbedaan antara frekuensi dasar (f_1) dan nada atas pertama (f_2)?

Jawab:

Berdasarkan persamaan 2.29,

$$f_n = n \frac{v}{2L}$$

$$f_1 = 1 \frac{340 \text{ m/s}}{2 \times 0,25 \text{ m}} = 680 \text{ /s} = 680 \text{ Hz}$$

$$f_2 = 2 \times 680 \text{ Hz} = 1360 \text{ Hz}$$

$$\text{Jadi } \Delta f = f_2 - f_1 = (1360 - 680) \text{ Hz} = 680 \text{ Hz}$$

Diskusikan

Berdasarkan contoh soal 2.6, berapa besar panjang gelombang pada nada dasarnya?

I. Pelayangan Gelombang

Fenomena interferensi yang sejauh ini kita pelajari adalah superposisi dua gelombang atau lebih dengan frekuensi sama dan menjalar dalam arah yang berlawanan. Karena hasil bentuk gelombangnya tergantung pada koordinat dari medium yang diganggu, maka dapat mengacu pada interferensi ruang. Gelombang berdiri dari tali dan pipa organa merupakan contoh interferensi ruang.

Sekarang kita perhatikan efek interferensi yang lain, satu diantaranya adalah akibat hasil superposisi dua gelombang dengan sedikit perbedaan frekuensi yang menjalar dalam arah yang sama. Dalam keadaan ini, kedua gelombang diamati pada titik tertentu secara periodik. Kalau diamati secara cermat, timbul perubahan fase, baik sefase atau kadang-kadang berbeda fase. Jadi, dalam keadaan ini terjadi perubahan pola interferensi konstruktif dan destruktif dalam waktu yang hampir sama. Fenomena seperti ini disebut interferensi sesaat (*temporal interference*). Contoh: dua buah garputala mempunyai sedikit perbedaan frekuensi. Keduanya dipukulkan pada meja, maka akan terdengar bunyi yang disebut layangan (*beat*).

Layangan adalah variasi intensitas pada titik tertentu yang secara periodik disebabkan oleh hasil superposisi dua gelombang yang mempunyai perbedaan frekuensi kecil. Jumlah layangan persatuan waktu disebut frekuensi layangan, sama dengan perbedaan frekuensi antara dua sumber. Perbedaan frekuensi yang masih bisa didengar oleh telinga manusia normal adalah 20 layangan/sekon. Bila frekuensinya melebihi nilai ini, campuran dua frekuensi tersebut sulit untuk dibedakan dengan komposisi bunyi yang menghasilkan layangan. Alat musik yang biasa menghasilkan layangan adalah piano.

Analisis secara matematika dapat ditunjukkan pada dua gelombang dengan amplitudo sama. Dua gelombang tersebut menjalar dengan arah yang sama pada suatu medium. Gelombang tersebut memiliki perbedaan frekuensi f_1 dan f_2 . Kita dapat memberikan gambaran bahwa tiap gelombang menghasilkan,

$$y_1 = A \cos 2\pi f_1 t \text{ dan } y_2 = A \cos 2\pi f_2 t$$

Dengan menggunakan prinsip superposisi, kita dapat menemukan, $y = y_1 + y_2 = A(\cos 2\pi f_1 t + \cos 2\pi f_2 t)$. Gunakan bentuk trigonometri dari $\cos a + \cos b = 2 \cos \left(\frac{a+b}{2} \right) \cos \left(\frac{a-b}{2} \right)$ sehingga,

$$y = 2A \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t \cos 2\pi \left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right) t \quad (2.31)$$

Persamaan 2.31 menunjukkan bahwa getaran di suatu titik tertentu mempunyai frekuensi efektif sama dengan frekuensi rata-rata, yaitu $\frac{f_1 + f_2}{2}$ dan amplitudo A adalah,

$$A' = 2A \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t \quad (2.32)$$

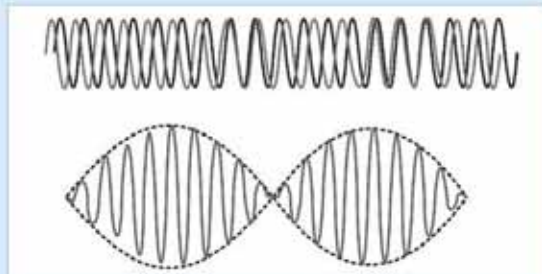
Persamaan 2.32 menunjukkan bahwa amplitudonya bervariasi terhadap waktu. Jika nilai f_1 mendekati f_2 , variasi amplitudonya lambat dan $(f_1 + f_2)$ yaitu sebagai gelombang amplop, lihat gambar 2.9.

Dari pers.(2.32) juga dapat ditunjukkan bahwa sebuah layangan dapat mempunyai amplitudo maksimum saat,

$$\cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t = \pm 1$$

Jadi, ada dua nilai maksimum secara bergantian. Karena amplitudo bervariasi terhadap frekuensi, maka jumlah layangan per sekon atau frekuensi layangan f_b adalah dua kali nilai tersebut. Yaitu,

$$f_b = f_1 - f_2 \quad (2.33)$$



Sumber: Hyperphysics.com.

Gambar 2.9 Superposisi dua gelombang

Contoh: jika dua garputala secara individual bergetar mempunyai frekuensi 438 Hz dan 442 Hz, gelombang bunyi yang dihasilkan adalah kombinasi dari dua frekuensi dibagi dua atau frekuensi rata-rata yaitu 440 Hz dan frekuensi layangannya adalah 4 Hz.

J. Resonansi Bunyi

Pada kelas XI kalian pernah mempelajari mengenai resonansi pada ayunan sederhana. Ketika apa bandul dapat beresonansi dengan bandul yang lain? Bagaimanakah frekuensi dan periode bandul pada ayunan tersebut? Bagaimana pula persamaannya? Sebagaimana ayunan sederhana, gelombang bunyi juga dapat mengalami resonansi.

Udara atau gas dalam suatu rongga atau kolom dapat beresonansi dengan sumber getaran lain, asalkan frekuensinya sesuai dengan frekuensi sumber getaran itu. Misalnya, pada alat-alat musik, gitar, gendang, gamelan dan lain-lainnya. Pada saat kalian memberikan energi ke gendang, maka gendang itu bergetar dan menimbulkan bunyi. Energi yang dirambatkan ke kolom udara adalah energi bunyi, sehingga terjadi perapatan dan perenggangan pada kolom udara. Perapatan dan perenggangan akan memunculkan konsep panjang gelombang, frekuensi dan kecepatan suara. Ingat pada pipa organa terbuka dan tertutup, bahwa faktor panjang kolom udara sangat menentukan besar kecilnya frekuensi. Sehingga untuk alat musik, desain kolom udara sangat menentukan kualitas bunyi yang dihasilkan, khususnya untuk terjadinya resonansi, dimana frekuensi gendang dengan frekuensi dalam kolom udara harus sama.

KISI

Ruang konser dirancang untuk meniadakan resonansi yang tidak dikehendaki. Pada ruang yang rancangannya buruk, gelombang bunyi pada frekuensi tertentu dapat dipantulkan ulang balik di antara dinding dan langit-langit, menyebabkan amplifikasi nada-nada musik tertentu. Nada-nada tertentu mungkin terdengar tidak nyaring di bagian-bagian tertentu ruang itu, sebaliknya di bagian-bagian lain nada-nada itu terdengar sangat nyaring. Di dalam ruangan ini, bentuk-bentuk geometris digantungkan dari langit-langit untuk meredam gema yang tidak dikehendaki.



Sumber: jarko.istok.3

K. Fenomena Bunyi

1. Pemantulan, Pembiasan dan Difraksi Bunyi

Karakteristik dari sifat gelombang adalah pemantulan, pembiasan, difraksi dan interferensi. Bunyi adalah gelombang longitudinal, oleh sebab itu bunyi mengalami fenomena pemantulan,

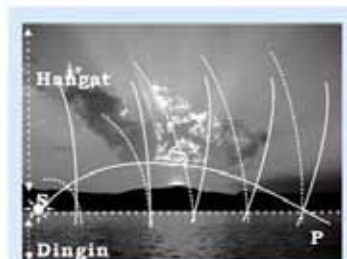
pembiasan dan difraksi. Suara gema atau *echo* adalah contoh terjadinya pemantulan. Pembiasan bunyi mungkin tidak biasa dirasakan atau diamati, namun bila dicermati, bisa dirasakan pada sore hari dengan cuaca terang dan dalam suasana tenang.

Kadang-kadang kita dapat mendengarkan bunyi atau suara lain dari jarak yang sangat jauh yang dalam keadaan biasa tidak dapat terdengar. Efek ini juga bisa dirasakan pada saat kalian bicara di siang dan malam hari. Pada malam hari suara bisik-bisik masih bisa didengar dibandingkan di siang hari. Peristiwa semacam ini disebabkan adanya faktor pembiasan gelombang bunyi saat mereka menjalar melalui medium (udara) yang berbeda kerapatannya. Perambatan seperti ini diperlukan adanya lapisan udara yang lebih dingin pada lapisan paling bawah, yaitu dekat permukaan tanah dan lebih hangat pada lapisan di atasnya. Kondisi seperti ini sering terjadi pada saat matahari terbenam, dimana seluruh benda di sekitar permukaan air lebih dingin, lihat gambar 2.10!

Gelombang bunyi dari sumber (S) tersebar ke atas. Dalam keadaan biasa, hal ini sulit untuk didengar oleh pendengar pada jarak yang cukup jauh. Karena gelombang bunyi melalui lapisan udara yang lebih hangat, mereka menjalar dengan cepat dan membelok ke arah pendengar (P). Ini dapat menaikkan intensitas bunyi yang diterima oleh pendengar. Jika intensitas bunyi tersebut di atas nilai ambang pendengaran, maka bunyi tersebut dapat didengar. Gelombang bunyi juga mengalami difraksi atau pembelokan di sekitar sudut atau pojok ruangan. Hal ini bisa dialami pada saat meletakkan *loudspeaker* di sudut-sudut ruangan.

Peristiwa tersebut merupakan **contoh kejadian sehari-hari** yang dapat dianalisis dengan fisika. Oleh karena itu bersemangatlah dalam mempelajari fisika, karena teori dan ilmunya pasti akan dapat diaplikasikan guna mempermudah pekerjaan kita.

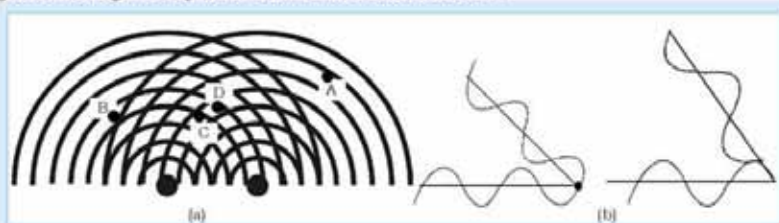
Pemantulan, pembiasan dan difraksi gelombang cahaya adalah fenomena yang penting untuk dibicarakan dalam bab tersendiri.



Gambar 2.10 Pembiasan gelombang bunyi

2. Interferensi Bunyi

Seperti pada sembarang jenis gelombang, gelombang bunyi berinterferensi jika keduanya bertemu. Bila ada dua buah *loud-speaker* yang dipisahkan pada jarak tertentu memancarkan gelombang bunyi dengan fase dan frekuensi yang sama. Perhatikan gambar 2.11a, *speaker* merupakan titik sumber bunyi. Dua sumber gelombang menyebar dan berinterferensi.



Gambar 2.11 Interferensi gelombang bunyi

Pada daerah tertentu, terjadi interferensi konstruktif dan destruktif. Contoh: jika dua gelombang yang mempunyai fase sama bertemu (dua pemampatan atau dua perenggangan), maka akan terjadi interferensi konstruktif. Ini bisa dilihat pada gambar 2.11(b), di titik C. Sebaliknya jika dua gelombang yang tidak sefase bertemu (pemampatan bertemu dengan perenggangan), titik D, maka keduanya akan saling meniadakan. Pada kedua gelombang ini terjadi interferensi destruktif.

Analisis matematis dapat kalian ikuti dalam penjabaran berikut: perhatikan gambar 2.11 di titik C, panjang lintasan adalah $AC = 4\lambda$ dan $BC = 3\lambda$. Perbedaan fase ($\Delta\phi$) dikaitkan dengan panjang lintasan (ΔL) dengan suatu hubungan yang sederhana,

$$\begin{aligned}\Delta\phi &= \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L \\ \Delta\phi &= \frac{2\pi}{\lambda} (AC - BC)\lambda = \frac{2\pi}{\lambda} (4 - 3)\lambda = 2\pi \text{ rad}\end{aligned}\quad (2.34)$$

Ketika $\Delta\phi = 2\pi$ rad, gelombang bergeser dengan satu panjang gelombang. Hal ini sama dengan ketika $\Delta\phi = 0^\circ$ dimana resultan gelombangnya sefase. Jadi, gelombang berinterferensi konstruktif yang dapat menaikkan intensitas atau bunyi bertambah keras (di titik C).

Oleh karena itu, berdasarkan persamaan 2.34 untuk mendapatkan interferensi konstruktif diperlukan perbedaan lintasan sebesar,

$$\Delta L = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (2.35)$$

Analisis serupa untuk gambar 1.11(c), yaitu terjadinya interferensi destruktif di mana $AD = 2\frac{3}{4}\lambda$ dan $AD = 2\frac{1}{4}\lambda$ diberikan oleh,

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta L$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} (2\frac{3}{4} - 2\frac{1}{4})\lambda = \frac{2\pi}{\lambda} (4 - 3)\lambda = \pi \text{ rad}$$

Atau

$\Delta\phi = 180^\circ$ sehingga di titik D terjadi perbedaan fase, dalam daerah ini terjadi interferensi destruktif.

Untuk mendapatkan interferensi destruktif diperlukan beda lintasan sebesar,

$$\Delta L = m\frac{\lambda}{2} \quad (m = 1, 3, 5, \dots) \quad (2.36)$$

Pada titik D akan terdengar bunyi dengan intensitas yang lebih rendah dan jika amplitudo kedua gelombang sama, maka terjadi total destruktif atau bunyi tidak akan terdengar sama sekali.

Contoh Soal 2.7

Pada siang hari (suhu 27°C) di panggung terbuka diadakan konser musik. Seseorang duduk pada jarak 7,00 m dan 9,10 m dari dua buah *speaker* yang diletakkan di panggung konser. Seorang pemusik melakukan uji coba dengan memainkan salah satu alat musik dengan frekuensi 494 Hz. Apa yang terjadi pada pendengar yang sedang duduk tersebut?

Penyelesaian:

Karena gelombang bunyi berinterferensi, apa yang didengar oleh orang tersebut tergantung pada perbedaan fase di lokasi orang yang sedang duduk. Oleh karena itu, berdasarkan soal kita dapatkan data sebagai berikut:

Diketahui:

$d_1 = 7,00\text{m}$ dan $d_2 = 9,10\text{ m}$
 $f = 494\text{ Hz}$
 $T = 25^\circ\text{C}$

Ditanya:

Perbedaan fase ($\Delta\phi$)?

Jawab:

Perbedaan fase dua titik sumber gelombang bunyi di tempat orang yang sedang duduk dapat ditentukan dengan perbedaan lintasan panjang gelombangnya.

Oleh sebab itu, kita perlu mengetahui panjang gelombang dengan menggunakan hubungan $\lambda = v/f$.

Kita hitung dengan menentukan kecepatan bunyi terhadap pengaruh suhu dengan menggunakan persamaan 2.1,

$$v = 331 + 0,6(T_C)$$

$$v = \{331 + 0,6(25)\} \text{ m/s} = 346 \text{ m/s}$$

$$\text{Panjang gelombang, } \lambda = \frac{v}{f} = \frac{346 \text{ m/s}}{494 \text{ Hz}} = 0,70 \text{ m}$$

Jadi, jarak dalam variabel λ adalah,

$$d_1 = (7,00 \text{ m}) \left(\frac{\lambda}{0,70 \text{ m}} \right) = 10,0 \lambda$$

$$d_2 = (9,10 \text{ m}) \left(\frac{\lambda}{0,70 \text{ m}} \right) = 13,0 \lambda$$

$$\text{Jadi } \Delta L = (d_2 - d_1) = (13,0 - 10,0)\lambda = 3,0 \lambda$$

Dari hasil perhitungan menunjukkan bahwa perbedaan lintasannya adalah $n = 3$, sehingga sesuai dengan persamaan 2.35, terjadi interferensi konstruktif, bunyi yang didengar terjadi kenaikan intensitas bunyi. Dengan kata lain, dua speaker terjadi saling menguatkan satu sama lain.

Diskusikan

Apa yang terjadi jika seorang duduk pada jarak 7,00 m dan 8,75 m dari dua *speaker* yang ada di panggung konser?

Rangkuman

1. Berdasarkan frekuensinya, gelombang longitudinal mekanik dibedakan menjadi: gelombang audio, gelombang infrasonik dan gelombang ultrasonik.
2. Cepat rambat gelombang bunyi bergantung pada suhu, dirumuskan, $v = (331 + 0,6 T_c) \text{ m/s}$
3. Besarnya cepat rambat gelombang bunyi pada gas

$$\text{dirumuskan, } v = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$$

4. Besarnya cepat rambat gelombang bunyi pada batang

$$\text{dirumuskan, } v = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$$

5. Besarnya cepat rambat gelombang bunyi pada zat cair

$$\text{dirumuskan, } v_0 = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$$

6. Persamaan simpangan gelombang bunyi adalah $y(x,t) = y_m \cos(kx - \omega t)$

7. Persamaan amplitudo simpangan gelombang bunyi adalah, $\Delta P = \Delta P_m \sin(kx - \omega t)$

8. Besarnya amplitudo tekanan berbanding lurus terhadap simpangan maksimum dan diberikan dalam bentuk persamaan, $\Delta P = \rho v \omega y_m$

9. Energi rata-rata dari lapisan gas adalah, $\Delta E = \frac{1}{2} \Delta m (\omega y_m)^2 = \frac{1}{2} (\rho \Delta V) (\omega y_m)^2$

10. Energi per satuan waktu adalah daya yang dirumuskan,

$$\frac{\Delta E}{\Delta t} = P_w = \frac{1}{2} (\rho \Delta v) (\omega y_m)^2$$

11. Daya per satuan waktu disebut intensitas, dirumuskan

$$I = \frac{P_w}{A} = \frac{1}{2} \rho (\omega y_m)^2 v$$

12. Besarnya intensitas bunyi dirumuskan, $\beta = 10 \log \frac{I}{I_0}$

13. Besarnya frekuensi yang didengar oleh pendengar apabila

$$\text{terdapat dua sumber bunyi adalah } f' = f \left(\frac{v \pm v_0}{v \mp v_s} \right)$$

14. Besarnya frekuensi pada pipa organa terbuka adalah, besarnya $f_n = n \frac{v}{2L} = n f_1$ di mana ($n = 1, 2, 3, \dots$)
15. Frekuensi pada pipa organa tertutup adalah $f_m = m \frac{v}{4L}$ di mana $m = 1, 3, 5, \dots$
16. Persamaan getaran ketika terjadi pelayangan adalah
- $$y = 2A \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t \cos 2\pi \left(\frac{f_1 + f_2}{2} \right) t$$
- $$A' = 2A \cos 2\pi \left(\frac{f_1 - f_2}{2} \right) t$$

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

- Bila dawai gitar dipetik maka akan menghasilkan getaran pada dawai tersebut. Hal ini menyebabkan partikel-partikel dalam tabung udara pada gitar ikut berosilasi sehingga menyebabkan udara di sekitarnya juga berosilasi, maka terjadilah rambatan bunyi. Pernyataan-pernyataan di bawah ini yang benar adalah....
 - senar gitar yang dipetik menghasilkan gelombang transversal
 - bunyi yang berasal dari senar gitar yang merambat adalah gelombang longitudinal
 - frekuensi bunyi yang merambat di udara sama dengan frekuensi senar gitar
 - bila dawai senar digetarkan dalam ruang hampa, maka tidak terdengar bunyi gitar
 - semua pernyataan di atas benar
- Pipa organa terbuka yang panjangnya 25 cm menghasilkan nada dasar sama dengan frekuensi yang dihasilkan oleh dawai yang panjangnya 150cm. Jika cepat rambat bunyi di udara 340m/s dan cepat rambat gelombang transversal pada dawai 510 m/s, maka dawai menghasilkan....

- a. nada dasar
 - b. nada atas pertama
 - c. nada atas kedua
 - d. nada atas ketiga
 - e. nada atas keempat
3. Sebuah tabung plastik dimasukkan ke dalam air. Di atas tabung digetarkan garputala yang frekuensinya 600 Hz. Jika resonansi pertama terjadi pada saat tinggi tabung yang di atas air 15 cm, maka cepat rambat bunyi di udara adalah....
 - a. 900 m/s
 - b. 90 m/s
 - c. 360 m/s
 - d. 720 m/s
 - e. 300 m/s
 4. Seseorang mendengarkan kembali suaranya sebagai gema dari tebing dalam waktu 6 sekon. γ adalah perbandingan antara kapasitas molar pada tekanan tetap dan volume tetap. Jarak tebing ketika suhu udara pada T (K) dan massa molekul relatif udara M , adalah....
 - a. $\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
 - b. $3\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
 - c. $5\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
 - d. $\sqrt{\frac{6\gamma RT}{M}}$
 - e. $6\sqrt{\frac{\gamma RT}{M}}$
 5. Panjang pipa organa tertutup sama panjang dengan panjang pipa gelas di atas permukaan air. Kedua alat tersebut diletakkan dalam ruang yang sama, maka....
 - a. frekuensi garputala yang digetarkan pada ujung pipa sama dengan nada dasar pada pipa organa tertutup
 - b. frekuensi garputala yang digetarkan pada ujung pipa sama dengan nada atas pertama pada pipa organa tertutup
 - c. frekuensi garputala yang digetarkan pada ujung pipa sama dengan nada atas kedua pada pipa organa tertutup
 - d. cepat rambat bunyi di udara yang berada di atas air lebih besar dari cepat rambat bunyi dalam pipa organa
 - e. semuanya jawaban di atas salah
 6. Taraf intensitas bunyi sebuah mesin adalah 60 dB, sedangkan taraf intensitas bunyi sebuah pabrik yang menggunakan beberapa mesin adalah 80 dB, maka jumlah mesin yang digunakan adalah....

- a. 200
 - b. 80
 - c. 400
 - d. 20
 - e. 100
7. Sebuah mobil polisi membunyikan sirine dan melaju dengan kecepatan $0,1u$ mendekati kalian yang sedang melaju dengan kecepatan $0,01u$ di mana u adalah laju bunyi di udara. Perbandingan frekuensi yang kalian dengar pada saat mobil mendekati dan menjauhi kalian adalah....
- a. 1,5
 - b. 1,8
 - c. 1,2
 - d. 1
 - e. 1,3
8. Sebuah bus melaju di belakang sepeda motor dengan kelajuan 90 km/jam. Pada saat bus membunyikan klakson dengan frekuensi 1000 Hz, pengendara motor membaca speedometer 72 km/jam. Bila cepat rambat bunyi di udara 340 m/s, maka pengendara motor akan mendengarkan klakson pada frekuensi...
- a. 1072 Hz
 - b. 1016 Hz
 - c. 1036 Hz
 - d. 1018 Hz
 - e. 1340 Hz
9. Apabila taraf intensitas bunyi dari dua macam bunyi berbeda 10 dB, maka rasio antara intensitas bunyi yang lebih tinggi dengan yang lebih rendah adalah....
- a. 100
 - b. 2
 - c. 20
 - d. 10
 - e. 110
10. Besarnya frekuensi untuk terjadinya resonansi yang ke n di dalam pipa organa dengan garputala adalah....
- a. $f_n = n \frac{v}{2L}$ untuk pipa organa terbuka dan $f_n = n \frac{v}{4L}$ bagi pipa organa tertutup, $n = 1, 2, 3, \dots$
 - b. $f_n = n \frac{v}{4L}$ untuk pipa organa terbuka dan $f_n = n \frac{v}{2L}$ untuk pipa organa tertutup, $n = 1, 2, 3, \dots$
 - c. $f_n = n \frac{v}{L}$ untuk pipa organa terbuka dan $f_n = n \frac{v}{2L}$ untuk pipa organa tertutup, $n = 1, 2, 3, \dots$

- d. $f_n = n \frac{v}{3L}$ untuk pipa organa terbuka dan $f_n = n \frac{v}{2L}$ untuk pipa organa tertutup, $n = 1, 2, 3, \dots$
 e. tidak ada jawaban yang benar

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

- (a) Jelaskan terbentuknya frekuensi-frekuensi harmonik (nada dasar dan nada-nada atas) pada sebuah dawai! (b) Jelaskan tentang terjadinya resonansi!
- Dua buah sumber bunyi terletak di titik P dan Q yang berjarak 10 m. Kedua sumber bunyi mempunyai fase dan frekuensi yang sama, yaitu 175 Hz. Titik R terletak di antara garis hubung PQ dimana RQ=6 m. Bila cepat rambat bunyi di udara 350 m/s, (a) Tentukan perbedaan fase antara dua gelombang yang sampai di titik R! (b) Tentukan hasil interferensi kedua fungsi gelombang bila kedua gelombang mempunyai amplitudo yang sama!
- Pipa organa mempunyai enam frekuensi harmonis (nada dasar frekuensi harmonis 1, nada atas 1= frekuensi harmonis 2, dan seterusnya) di bawah 1000 Hz. Berikut ini adalah empat dari enam frekuensi harmonis tersebut: 300 Hz, 600 Hz, 750 Hz, dan 900 Hz. Tentukan dua frekuensi harmonis yang hilang!
- Kita mempunyai sebuah dawai yang panjangnya L , tiga pipa organa tertutup yang panjangnya masing-masing $2L$, L , dan $\frac{1}{2}L$; dan dua buah pipa organa terbuka yang panjangnya L dan $\frac{1}{2}L$. Untuk gaya tegangan tertentu, cepat rambat gelombang pada dawai sama dengan cepat rambat gelombang bunyi di udara. Jelaskan pipa organa yang mana yang menghasilkan frekuensi yang beresonansi dengan nada dasar dawai? Apakah jenis nada yang dihasilkan pipa organa tersebut?
- Frekuensi diagnostik yang digunakan USG untuk mendeteksi tumor pada jaringan lunak adalah 4,5 MHz.
 (a) Berapakah besarnya panjang gelombang pada frekuensi diagnostik untuk gelombang bunyi yang merambat di udara?
 (b) Bila kelajuan bunyi pada jaringan lunak adalah 1500 m/s, berapakah panjang gelombangnya?

6. Sebuah sumber bunyi memancarkan gelombang bunyi secara isotropis. Bila besarnya intensitas bunyi pada sebuah titik yang berjarak 3,5 m dari sumber bunyi adalah $2 \times 10^{-4} \text{ watt/m}^2$. Tentukan daya sumber bunyi tersebut!
7. Nada dasar sebuah pipa organa terbuka adalah 300 Hz. Nada atas ke-2 dari pipa organa tertutup sama besar dengan nada atas pertama pipa organa terbuka. Tentukan panjang pipa organa terbuka dan tertutup tersebut!
8. Dawai pada violin terikat terlalu kuat. Empat layangan terdengar bila senar violin dan garputala berosilasi bersama. Bila frekuensi garputala adalah 440 Hz, berapakah periode osilasi senar violin?
9. Seorang anak perempuan duduk di dekat jendela dalam gerbong kereta api yang melaju ke timur dengan kecepatan 10 m/s. Sedangkan pamannya masih berdiri di tepi rel. Peluit kereta api dibunyikan di lokomotif secara nyaring dengan frekuensi 500 Hz. Bila kondisi udara tenang, hitung frekuensi yang didengar oleh gadis dan pamannya tersebut!
10. Dua gelombang bunyi intensitasnya sama, yang satu merambat di udara dan yang lain merambat di air. Tentukan perbandingan amplitudo tekanan dari dua gelombang tersebut!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab III

Optik Geometri

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat mendeskripsikan gejala dan ciri-ciri gelombang cahaya serta menerapkan konsep dan prinsip gelombang cahaya dalam teknologi.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Fokus
2. Jari-jari kelengkungan
3. Lensa
4. Cermin

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

1. Sinar dan muka gelombang
2. Pemantulan dan pembiasan cahaya
3. Pembiasan pada prisma

Optik adalah ilmu yang mempelajari cahaya dan penglihatan. Penglihatan manusia memerlukan cahaya khususnya cahaya tampak.

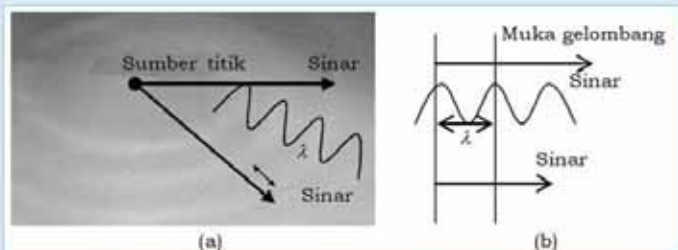
Pada bab ini kalian akan diajak untuk menyelidiki secara mendasar tentang gejala optis mengenai pemantulan dan pembiasan (cahaya sebagai bentuk gelombang elektromagnetik dapat dibuktikan lewat gejala pemantulan, pembiasan, difraksi, dan interferensi). Prinsip yang menunjukkan gejala pemantulan

dapat dipelajari dengan cermin sedangkan prinsip yang menunjukkan gejala pembiasan dapat dipelajari pada lensa dan aplikasinya pada kacamata, mikroskop, dan teleskop. Sejalan dengan perkembangan ilmu dan teknologi, fiber optik merupakan perkembangan yang luar biasa dari bidang teknologi komunikasi atau bidang kedokteran.

Pendekatan optik geometri merupakan suatu pendekatan yang secara geometri menggunakan garis dan sudut untuk menganalisis fenomena optis pada cermin atau lensa. Dalam hal ini berkas cahaya yang menumbuk pada cermin atau lensa dianggap sebagai suatu berkas cahaya yang terdiri dari sekelompok sinar yang merambat sebagai bentuk garis lurus. Dengan kata lain, sinar adalah berkas cahaya yang merambat sebagai garis lurus dan tegak lurus terhadap muka gelombang, lihat gambar 3.1. Dengan menggunakan pendekatan ini kalian dapat menganalisis fenomena optis yang berkaitan dengan pemantulan dan pembiasan.

A. Sinar dan Muka Gelombang

Muka gelombang adalah sebuah garis atau permukaan yang didefinisikan oleh bagian gelombang yang berdekatan dan mempunyai fase yang sama. Contoh, pada sebuah puncak gelombang yang bergerak dengan arah keluar dari titik sumber gelombang, semua partikel yang berada pada garis puncak akan mempunyai fase yang sama, lihat gambar 3.1.



Gambar 3.1 (a) Sebuah gelombang air yang dihasilkan oleh tangki riak. Di dekat sumber, muka gelombang membentuk lingkaran (dua dimensi), (b) Jauh dengan sumber muka gelombang berbentuk linier

Pada gambar 3.1(a) muka gelombang dekat sumber akan berbentuk lingkaran pada bidang dua dimensi dan akan berbentuk

bola untuk tiga dimensi. Namun jika muka gelombang tersebut menjauh dari sumber, maka akan tampak linier atau garis lurus seperti permukaan bumi nampak datar, lihat gambar 3.1(b). Muka gelombang linier disebut gelombang bidang. Muka gelombang melingkar disebut gelombang selinder, sedang untuk gelombang tiga dimensi disebut gelombang bola. Dalam medium yang homogen, muka-muka gelombang menjalar ke luar dari sumber mempunyai kelajuan gelombang yang berbeda tergantung pada medium yang digunakan. Contoh: gelombang cahaya yang menjalar pada medium vakum mempunyai kelajuan $3,00 \times 10^8$ m/s.

Deskripsi secara geometri untuk sebuah gelombang yang menggunakan konsep muka gelombang cenderung diabaikan, karena pada kenyataannya gelombang berbentuk sinusoidal. Oleh sebab itu, dalam analisis lebih lanjut kita menggunakan konsep sinar, lihat gambar 3.1 dan 3.2. Perlu diperhatikan bahwa sinar merupakan bentuk aliran energi dalam sebuah gelombang. Sebuah muka gelombang bidang dianggap menjalar dalam sebuah garis lurus dalam suatu medium dan searah dengan arah sinarnya. Gambar 3.2 menunjukkan seberkas cahaya yang disajikan sebagai seberkas sinar yang sejajar atau sinar tunggal. Dalam analisis yang berkaitan dengan fenomena optis dari cahaya, cukup diwakili dengan menggunakan konsep sinar. Sedang untuk fenomena yang lain seperti fenomena interferensi, tidak dapat menggunakan cara seperti ini dan harus diterangkan dengan menggunakan sifat gelombang yang lebih aktual.



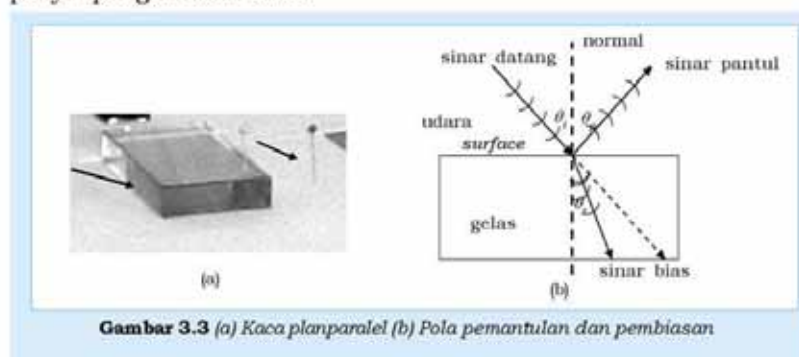
Gambar 3.2 Berkas cahaya.

B. Pemantulan dan Pembiasan

Pemantulan cahaya adalah fenomena optis yang sangat penting karena jika tidak ada pemantulan cahaya maka kita tidak dapat melihat benda-benda yang ada di sekitar kita. Konsep pemantulan adalah suatu konsep yang mencakup konsep serapan (*absorpsi*) dan pemantulan kembali atau meradiasikan kembali cahaya tersebut.

Secara umum, jika berkas cahaya mengenai suatu permukaan dari medium yang berbeda akan menyebabkan beberapa kemungkinan, diantaranya adalah serapan, pantulan dan pembiasan. Jadi, jika seberkas cahaya yang merambat dalam udara mengenai medium yang berbeda kerapatannya (misalkan gelas) dengan sudut datang θ_i , maka sebagian berkas cahaya tersebut akan dipantulkan kembali oleh permukaan dengan sudut pantul θ_r . Sebagian berkas cahaya yang masuk ke dalam gelas akan dibiaskan dengan sudut bias θ_t . Berkas cahaya yang merambat masuk melalui permukaan (*surface*) antara dua medium yang berbeda disebut pembiasan dan berkas cahaya yang terbias disebut cahaya bias.

Kecuali berkas yang datang tegak lurus terhadap permukaan, pembiasan oleh permukaan akan menyebabkan perambatan berkas cahaya biasnya akan mengalami perubahan arah. Dengan alasan ini, berkas cahaya dikatakan menyimpang atau membias. Penyimpangan berkas cahaya hanya terjadi di permukaan gelas. Di dalam gelas, berkas cahaya tetap menjalar sebagai garis lurus. Sinar yang datang tegak lurus terhadap permukaan tidak akan mengalami penyimpangan arah sinar.



Gambar 3.3 (a) Kaca planparalel (b) Pola pemantulan dan pembiasan

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan sosial** kalian, lakukanlah kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Diskusikan dengan teman kalian; apakah untuk sinar yang datang tegak lurus pada permukaan dari medium berbeda tidak mengalami peristiwa pembiasan?

Dalam optik geometri, gejala seperti ini (lihat gambar 3.3(a) dan 3.3(b) mudah digambarkan dengan menggunakan konsep sinar. Gambar 3.3 adalah sebuah kaca plan paralel. Dengan menggunakan jarum, kita dapat menunjukkan gejala pembiasan, seperti diagram benda bebas dimana tanda anak panah menunjukkan jalannya sinar.

Gambar 3.3(b) menunjukkan berkas cahaya yang diwakili oleh sebuah sinar datang, sinar pantul, sinar bias dan muka gelombang. Sinar datang, sinar pantul dan sinar bias diorientasikan pada satu garis yang disebut garis normal atau biasa disebut normal. Garis normal yaitu sebuah garis yang tegak lurus terhadap permukaan di titik pemantulan dan pembiasan. Seperti terlihat pada gambar 3.3, sudut datang θ_i , sudut pantul θ_p dan sudut bias θ_r selalu diukur relatif terhadap normal.

Penelitian menunjukkan bahwa pemantulan dan pembiasan mempunyai suatu ketentuan sebagai berikut:

1. Hukum pemantulan

Sinar pantul yang terletak dalam satu bidang, mempunyai sudut pantul sama dengan sudut datang. Secara matematik dapat dituliskan,

$$\theta_i = \theta_p \quad (3.1)$$

2. Hukum pembiasan

Sinar bias yang terletak dalam satu bidang datang, mempunyai sudut bias θ_r berkaitan dengan sudut datang θ_i yang secara matematik dapat ditulis dengan bentuk persamaan,

$$n_2 \sin \theta_r = n_1 \sin \theta_i \quad (3.2a)$$

atau

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r} \quad (3.2b)$$

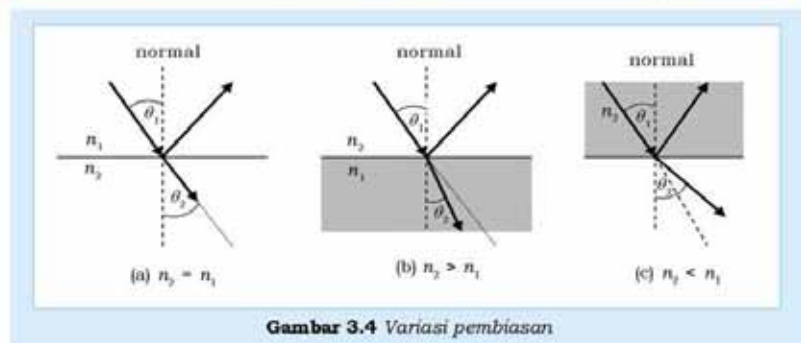
di mana n_1 dan n_2 adalah konstanta tak berdimensi yang disebut indek bias yang dikaitkan dengan kerapatan medium. Persamaan 3.2a atau 3.2b disebut hukum Snellius.

Dengan kata lain, hukum pembiasan atau hukum Snellius tentang pembiasan adalah perbandingan sudut datang terhadap sudut bias merupakan bilangan konstan. Perbandingan n_2 terhadap n_1 disebut indek bias relatif. Jika n_1 adalah indek bias udara yang besarnya mendekati nilai satu, maka n_2 disebut indek bias mutlak.

Tabel 3.1 memberikan daftar indeks bias dari berbagai material. Untuk ruang vakum $n = 1$, dan n udara mendekati satu. Perhatikan, dalam tabel 3.1 tidak ada indeks bias yang kurang dari satu, dan indeks bias terbesar adalah diamond.

Tabel 3.1 Daftar Indeks Bias Beberapa Medium

Medium	Indeks Bias	Medium	Indeks Bias
Vakum	1	Gelas crown	1,52
Udara	1,00029	NaCl	1,54
Air (20°C)	1,33	Polystyrene	1,55
Aceton	1,36	Karbon disulfida	1,63
Ethyl alkohol	1,36	Diamond	2,42
Larutan gula (30%)	1,38	Sapphire	1,77
Larutan gula (80%)	1,49		



Dari persamaan 3.2 nilai sudut bias tergantung pada nilai relatif n_2 terhadap n_1 . Oleh karena itu, ada tiga hal yang perlu diperhatikan, yaitu:

1. Jika n_2 sama dengan n_1 , maka θ_r sama dengan θ_i . Dalam keadaan seperti ini sudut sinar bias sama dengan sudut sinar datang, lihat gambar 3.4(a)!
2. Jika $n_2 > n_1$, maka $\theta_r < \theta_i$, dalam keadaan ini pembiasan yang terjadi adalah berkas cahaya akan dibiaskan mendekati normal, lihat gambar 3.4(b)!
3. Jika $n_2 < n_1$, maka $\theta_r > \theta_i$, dalam keadaan ini pembiasan yang terjadi adalah berkas cahaya akan dibiaskan menjauhi normal, lihat gambar 3.4(c)!

C. Penurunan Hukum Snellius

Perubahan arah dari penjalaran gelombang digambarkan dengan menggunakan sudut bias. Pada gambar 3.5, sudut datang adalah θ_1 dan sudut bias adalah θ_2 . Dari gambar 3.5 berlaku hubungan

$$\sin \theta_1 = \frac{v_1 t}{d} \text{ dan } \sin \theta_2 = \frac{v_2 t}{d} \quad (3.3)$$

di mana d adalah jarak antara normal terhadap bidang batas. Kombinasi dari keduanya persamaan 3.3 didapatkan,

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} \quad (3.4)$$

Persamaan 3.4 disebut hukum Snellius. Berdasarkan persamaan 3.4, berkas cahaya akan dibiaskan ketika melewati satu medium ke medium yang lain dikarenakan adanya perbedaan kecepatan rambat cahaya. Kecepatan cahaya paling besar di medium vakum (yaitu $c = 3,0 \times 10^8$ m/s). Untuk menghitung kecepatan pada suatu medium (v) dapat dilakukan dengan mengkombinasi persamaan 3.4 dengan persamaan 3.2b, di mana n_1 adalah indeks bias vakum sehingga didapatkan bentuk persamaan,

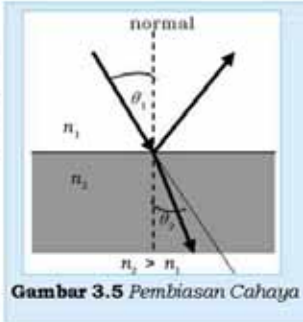
$$n = \frac{c}{v} \quad (3.5)$$

Persamaan 3.5 menunjukkan bahwa harga indeks bias tidak mempunyai satuan.

Frekuensi cahaya tidak akan berubah jika masuk ke medium lain, tetapi panjang gelombangnya mengalami perubahan (λ_m), ini dapat ditunjukkan dengan,

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda f}{\lambda_m f} \rightarrow n = \frac{\lambda}{\lambda_m} \quad (3.6)$$

Berdasarkan persamaan 3.6, panjang gelombang cahaya dalam suatu medium dirumuskan, $\lambda_m = \frac{\lambda}{n}$, di mana n selalu lebih besar daripada 1 (satu) karena kecepatan cahaya di dalam vakum lebih besar daripada kecepatan di sembarang benda (material) $c > v$. Oleh karena itu, $\lambda > \lambda_m$.



Gambar 3.5 Pembiasan Cahaya

Karena kita melihat bahwa indeks bias n adalah sebuah pengukuran kecepatan cahaya dalam benda yang transparan (bersifat optis), maka secara teknis dapat digunakan untuk mengukur kerapatan dari sebuah benda. Contoh: kecepatan cahaya dalam air lebih kecil daripada di udara, sehingga air mempunyai kerapatan lebih besar daripada di udara. Sebuah benda yang mempunyai kerapatan optis lebih besar dari benda yang lain, akan mempunyai kerapatan massa yang lebih rendah. Sehingga, semakin besar indeks bias dari suatu benda, semakin besar kerapatan optisnya dan semakin kecil kecepatan cahaya dalam benda tersebut. Untuk mudahnya, indeks bias diukur di udara daripada di vakum, karena kecepatan di udara hampir mendekati c dan

$$n_{\text{udara}} = \frac{c}{c} = 1$$

Indeks bias sebuah benda bisa ditentukan dengan menggunakan hukum Snellius,

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{c/n_1}{c/n_2} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \quad (3.7)$$

Persamaan 3.7 merupakan bentuk lain dari hukum Snellius, di mana n_1 dan n_2 adalah indeks bias untuk medium ke-1 dan medium ke-2.

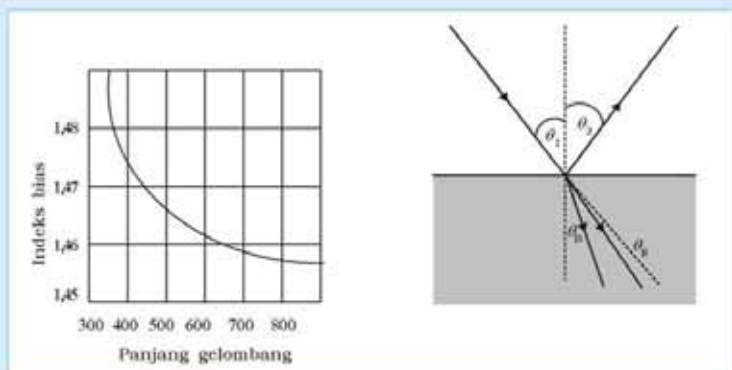
D. Dispersi

Ketergantungan indeks bias n pada panjang gelombang secara matematika dapat ditulis dalam bentuk persamaan,

$$\frac{n_2}{n_1} = \frac{c/v_2}{c/v_1} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \quad (3.8)$$

Persamaan 3.8 menunjukkan bahwa sebuah berkas cahaya yang mempunyai panjang gelombang berbeda ketika melewati medium yang berbeda, mereka akan dibiaskan dengan sudut bias yang berbeda, sehingga cahaya bias akan terpisah sesuai dengan sudut bias dari masing-masing panjang gelombangnya, lihat gambar 3.6. Terpisah atau terurainya berkas cahaya tersebut disebut dispersi kromatik. Kromatik mengacu pada warna-warna yang dikaitkan dengan panjang gelombang masing-masing. Dispersi mengacu pada terurainya cahaya menurut panjang gelombangnya. Pada gambar

3.6 tidak menunjukkan dispersi kromatik, karena berkas cahayanya digambarkan sebagai cahaya monokromatik (warna tunggal atau panjang gelombang tunggal).



Gambar 3.6 Indeks bias kaca kuarsa sebagai fungsi panjang gelombang cahaya yang melewatinya

Secara umum, besarnya indeks bias medium tertentu akan lebih besar untuk panjang gelombang yang lebih pendek dibandingkan untuk panjang gelombang yang lebih panjang (misal λ merah $>$ λ biru). Hubungan tersebut menunjukkan apabila cahaya biru dan cahaya merah bersama-sama merambat dari udara ke kaca atau sebaliknya, maka cahaya biru akan mengalami pembelokan lebih besar daripada cahaya merah.

Berkas cahaya putih terdiri dari cahaya-cahaya yang berwarna dalam spektrum cahaya tampak yang intensitasnya hampir homogen. Bila kalian melihat berkas cahaya putih, kalian akan melihat warna putih daripada melihat masing-masing warna cahaya tunggal. Untuk memisahkan cahaya-cahaya berwarna dari cahaya putih, digunakan kaca berbentuk prisma segitiga seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.7. Penguraian cahaya putih menjadi cahaya berwarna dialami pada permukaan gelas pertama dan diperkuat pada permukaan gelas kedua.

Contoh penguraian cahaya putih menjadi cahaya berwarna yang paling menarik adalah terciptanya pelangi pada



Sumber: Jendela Iptek 2

Gambar 3.7 Penguraian cahaya putih menjadi cahaya-cahaya berwarna

saat hujan rintik-rintik. Pelangi terbentuk pada saat cahaya putih matahari jatuh pada titik air hujan. Cahaya tersebut mengalami pembiasan dan penguraian, kemudian di dalam tetes air hujan, cahaya yang terurai mengalami pemantulan sempurna beberapa kali dan kemudian dibiaskan lagi keluar dari tetes air hujan. Pelangi terbentuk lewat proses oleh sekumpulan tetes air hujan. Tetes air hujan ini fungsinya mirip kaca prisma di atas. Pelangi akan tampak di langit berlawanan arah dari arah tampaknya Matahari. Cahaya biru akan tampak pada bagian lebih bawah sedangkan cahaya merah lebih atas. Antara cahaya biru dan merah tampak beberapa warna cahaya yang lain. Sudut yang terbentuk antara berkas cahaya pada pelangi dengan cahaya putih yang datang dari matahari adalah 42° . Setiap pengamat melihat pelangi yang berbeda karena posisi pengamatannya berbeda.

KISI

Jika dilihat dari sudut tertentu, kaca dapat bekerja sebagai cermin. Di masa lampau, kaca diciptakan untuk menciptakan "hantu" di panggung. Sebenarnya, hantu itu adalah seorang pemain yang berada di bawah panggung. Sebidang kaca yang dipasang miring memantulkan cahaya dari pemain hantu itu ke penonton. Mereka melihat hantunya, tetapi kacanya tidak terlihat.



Sumber: Jendri Intek 2

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 3.1

1. Berkas cahaya monokromatik mengalami pemantulan dan pembiasan di titik A pada bidang batas antara medium I yang indeks biasnya $n_1=1,33$ dan medium II, $n_2 = 1,77$. Bila sinar datang membentuk sudut 50° terhadap bidang batas antara dua medium, berapakah besarnya sudut pantul dan sudut bias?

Penyelesaian:

Besarnya sudut pantul sama dengan sudut datang. Sudut datang adalah sudut yang dibuat antara sinar datang dan garis normal pada bidang batas antara kedua medium, sedangkan sudut pantul adalah sudut yang dibuat antara sinar pantul dengan garis normal. Maka besarnya sudut

pantul adalah sebesar 40° . Untuk menentukan besarnya sudut bias digunakan Hukum Snellius: $n_1 \sin \theta_i = n_2 \sin \theta_r$.

Dari soal di atas maka $\sin \theta_r = \frac{1,33}{1,77} \sin 40^\circ$ atau $\theta_r = 28,88^\circ$

Perhitungan menunjukkan bahwa bila cahaya datang dari medium renggang menuju ke medium yang lebih rapat, maka cahaya akan dibiaskan mendekati normal.

2. Bila cahaya pada soal 1) kemudian merambat melewati bidang batas antara medium II dan medium III di titik B maka sebagian dari cahaya tersebut dipantulkan di dalam medium II dan sebagian lagi dibiaskan oleh medium III. Bila medium III adalah udara yang indeks biasanya 1,00, berapakah besarnya sudut pantul dan sudut bias di titik B?

Penyelesaian:

Besarnya sudut pantul di titik B sama besar dengan sudut bias di titik A, yaitu $28,88^\circ$. Sama seperti pada soal 1) besarnya sudut bias di titik B ditentukan dengan Hukum

Snellius, yaitu $\sin \theta_{r3} = \frac{1,77}{1} \sin 28,88^\circ$ atau $\theta_{r3} = 58,75^\circ$.

Hasil ini menunjukkan bahwa sinar bias menjauhi normal karena pembiasan terjadi dari medium yang lebih rapat ke medium yang lebih renggang.

E. Pemantulan Total

Dalam peristiwa pemantulan dan pembiasan yang dibahas di depan, kita selalu menentukan sudut datang tertentu. Apa yang terjadi bila sudut datang diperbesar secara bertahap dan terus menerus bila sinar datang dari medium renggang ke medium rapat? Apakah selalu terjadi pemantulan dan pembiasan? Bagaimana kalau sinar merambat dari medium rapat ke medium yang renggang, apakah dengan memperbesar sudut datang juga tetap terjadi proses pembiasan dan pemantulan?

Untuk menjawab pertanyaan di atas, maka lukislah perambatan sinar yang melewati bidang batas antara udara dan air dengan sudut datang dari 30° sampai dengan 75° . Dari gambar tersebut

kalian dapat menunjukkan bahwa sinar datang dengan sudut datang antara $30^\circ - 75^\circ$ selalu terjadi pemantulan dan pembiasan. Lukis pula jika sinar datang berasal dari air kemudian melewati bidang batas dan menuju ke udara!

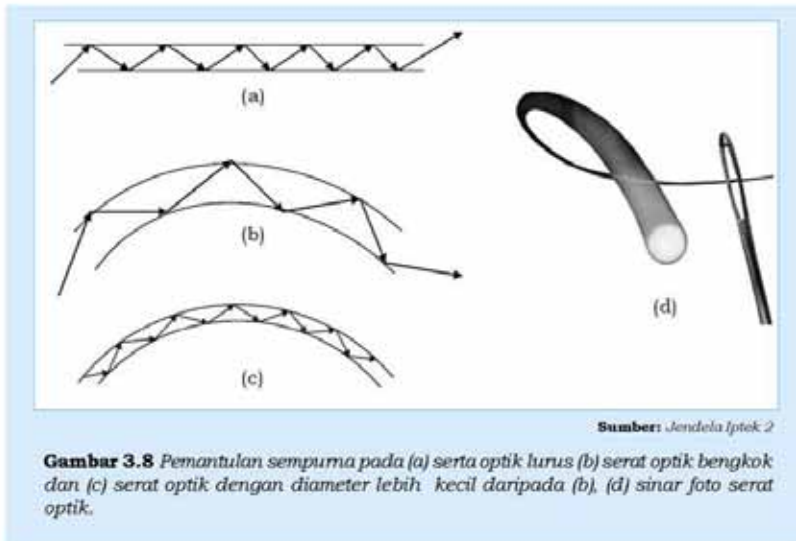
Dari gambar perambatan sinar dari air ke udara, ternyata tidak semua sinar datang dengan rentang sudut datang tersebut dapat dibiaskan, tetapi terjadi pula pemantulan. Pemantulan sempurna terjadi bila berkas sinar datang merambat dari medium yang lebih rapat ke medium yang renggang dan di bidang batas antara kedua medium tersebut, semua sinar dipantulkan tanpa mengalami pembiasan. Agar pemantulan sempurna terjadi, maka sinar datang yang jatuh pada bidang batas tersebut harus mempunyai sudut datang lebih besar dari sudut kritis. Sudut kritis adalah besarnya sudut datang dari sinar yang merambat dari medium yang lebih rapat ke medium yang renggang sedemikian hingga menghasilkan sinar bias dengan sudut bias sebesar 90° . Jadi, besarnya sudut

kritis adalah $\sin \theta_{kr} = \frac{n_2}{n_1}$ di mana n_2 harus lebih kecil dari n_1 . Bila medium kedua adalah udara, $n_2 = 1$, besarnya sudut kritis agar terjadi pemantulan total pada bidang batas dari suatu zat antara ke udara adalah $\sin \theta_{kr} = \frac{1}{n}$.

Aplikasi konsep pemantulan sempurna banyak ditemui di bidang komunikasi dan kedokteran. Salah satu aplikasi pemantulan total pada bidang komunikasi adalah rambatan gelombang elektromagnetik di dalam serat optik.

Serat optik adalah kabel yang sangat halus (diameternya sangat kecil) dan transparan yang digunakan untuk mentransmisikan cahaya. Prinsip kerjanya berdasarkan pemantulan sempurna. Pemantulan sempurna dapat terjadi berulang kali pada serat transparan walau serat transparan tersebut membengkok. Dari gambar 3.8 dapat ditunjukkan bahwa semakin kecil diameter pipa, semakin banyak jumlah pemantulan sempurna terjadi. Maka dalam serat optik yang diameter penampangnya sangat kecil sepanjang satu cm pipa, dapat terjadi ratusan pemantulan sempurna. Pemantulan sempurna adalah proses transmisi cahaya dengan efisiensi yang sangat luar biasa. Serat optik dapat mentransmisikan cahaya pada jarak jauh dengan rugi transmisi sekitar 25% per km. Kerugian ini terutama disebabkan oleh ketidaksempurnaan dinding dalam serat yang menyebabkan hamburan. Serat optik terbuat dari plastik dan gelas khusus untuk menghasilkan transmisi maksimum.

Efisiensi terbesar dicapai bila meradiasikan cahaya inframerah, karena hamburannya terkecil.



F. Cermin dan Lensa

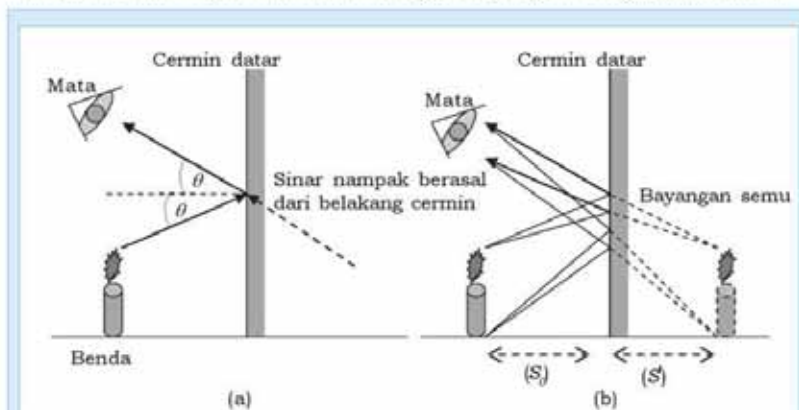
Dalam kehidupan sehari-hari setiap orang pasti menggunakan cermin atau lensa, cermin sebagai alat pendukung untuk berhias diri. Kendaraan hiruk pikuk sepanjang siang hari juga selalu membutuhkan cermin untuk membuat perjalanan lebih nyaman, sebab tanpa cermin seseorang harus menengok ke belakang bila akan berbelok atau mendahului kendaraan yang lain. Cermin dan lensa juga dipakai untuk teropong dan teleskop yang di pasang di bumi maupun di ruang angkasa, seperti teleskop Hubble. Untuk dapat melihat jasad renik juga diperlukan mikroskop.

Dalam bab berikut kita akan mempelajari bagaimana cermin dan lensa bekerja. Cara kerja cermin dan lensa didasarkan pada prinsip pemantulan dan pembiasan cahaya. Pembentukan bayangan oleh cermin dan lensa akan dikaji secara memadai.

1. Cermin Datar

Cermin adalah permukaan halus yang memantulkan cahaya, biasanya terbuat dari logam yang mengkilap atau kaca yang dilapisi dengan material logam.

Cermin dengan permukaan datar disebut cermin datar. Pembentukan bayangan oleh cermin datar ditunjukkan pada gambar 3.9(a). Seperti kita ketahui, bayangan dapat terletak di belakang atau di dalam cermin. Hal ini terjadi karena cermin memantulkan cahaya dari benda menuju ke mata, bayangan yang tampak oleh kita berasal dari belakang cermin. Cahaya yang dipantulkan dari bagian atas dan bawah benda ditunjukkan pada gambar 3.9(b). Sesungguhnya, cahaya datang dari semua titik pada benda menuju ke cermin dan dipantulkan, sehingga bayangan lengkap diamati.



Gambar 3.9 Pembentukan bayangan pada cermin datar

Bayangan yang terbentuk dengan cara ini terlihat di belakang cermin dan disebut bayangan maya atau semu. Cahaya yang tampak berasal dari bayangan maya, tetapi sebenarnya tidak seperti itu.

Cermin berbentuk bola dapat menghasilkan bayangan yang mana cahaya betul-betul berasal dari bayangan tersebut. Bayangan ini disebut bayangan nyata, contoh bayangan nyata adalah film di bioskop. Pada cermin datar, besarnya jarak benda S_0 dan jarak bayangan S' sama besar ($S_0 = S'$), tapi berada di belakang cermin.

Ada bermacam-macam karakteristik dari bayangan. Perbandingan antara tinggi bayangan dan tinggi benda disebut perbesaran (M). Untuk cermin datar, bisa ditunjukkan bahwa besarnya perbesaran sama dengan 1, maka kalian akan melihat bahwa besarnya bayangan (h_i) pada cermin datar sama besar dengan benda (h_o). Secara matematis dituliskan dalam bentuk persamaan,

$$M = \frac{h_i}{h_o}$$

Contoh Soal 3.2

Berapa tinggi minimum cermin yang diperlukan agar seorang dapat melihat bayangan secara penuh dari ujung kepala sampai ujung kakinya?

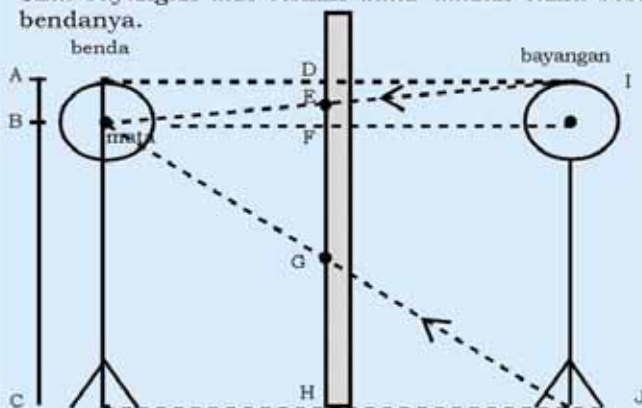
Penyelesaian:

Tinggi orang seluruhnya = $AC = DH = IJ$

AB = jarak dari mata ke ujung kepala

BC = jarak dari mata ke ujung kaki

Sifat bayangan dari cermin datar adalah sama besar dengan bendanya.



Gambar 3.10 Pembentukan bayangan pada cermin datar

Ketika orang bercermin, semua sinar pantul menuju mata. Bayangan ujung kepala dan ujung kaki akan dilihat oleh mata.

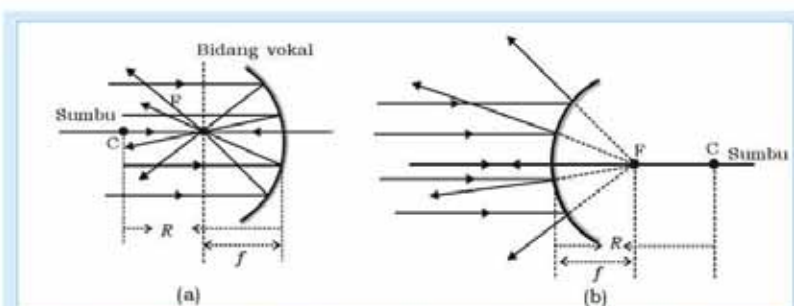
Sinar pantul kepala adalah BI
 Sinar pantul dari kaki adalah BJ
 Dari gambar diketahui bahwa
 $DE = \frac{1}{2} DF$, $AB = DF \rightarrow DE = \frac{1}{2} AB$
 $GH = \frac{1}{2} FH$, $FH = BC \rightarrow GH = \frac{1}{2} BC$
 Tinggi cermin yang dibutuhkan untuk melihat tinggi kita seluruhnya adalah EG
 $EG = DH - (DE + GH)$
 $= AC - (\frac{1}{2} AB + \frac{1}{2} BC)$ di mana $AB + BC = AC$
 $= AC - \frac{1}{2}(AB + BC)$
 $= \frac{1}{2}AC$

Dari uraian di atas, maka tinggi cermin minimal yang di butuhkan adalah $t = \frac{1}{2} AC$
 $= \frac{1}{2}$ tinggi orang yang sedang bercermin

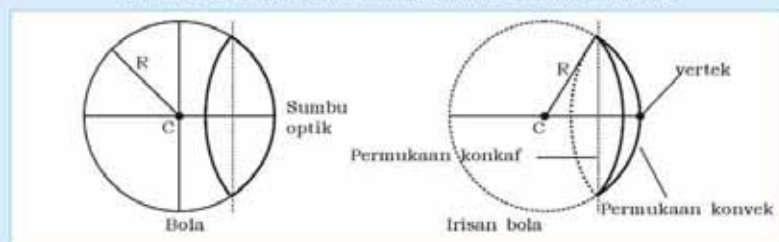
2. Cermin Spheris (Bola)

Sesuai dengan namanya, cermin bola adalah sebuah pemantulan permukaan dengan geometri bola. Seperti pada gambar 3.11, jika sebuah bagian dari bola dengan radius R dipotong atau diiris, maka beberapa irisan tersebut mempunyai bentuk cermin bola. Bagian dalam atau luar dari irisan itu bisa memantulkan cahaya atau sinar. Jika bagian dalam untuk pemantulan, maka disebut cermin konkaf (cermin cekung). Sebaliknya, untuk bagian luar yang digunakan untuk pemantulan, disebut cermin konvek (cermin cembung).

Garis radial melalui pusat cermin bola disebut sumbu optik. Titik pada sumbu optik yang berkaitan terhadap pusat bola yang mana cermin terbentuk disebut pusat kelengkungan (C). Jarak antara vertek dan pusat kelengkungan yang mana sama dengan jari-jari bola disebut jari-jari kelengkungan, R .



Gambar 3.11 (a) Cermin cekung dan (b) Cermin cembung



Gambar 3.12 Cermin bola

Jika sinar datang sejajar dengan sumbu optik pada cermin cekung, sinar akan dipantulkan lewat titik fokus, sehingga cermin cekung bersifat konvergen, lihat gambar 3.11(a). Jika sinar sejajar sumbu optik dikenakan pada cermin cembung, maka sinar yang dipantulkan menyebar dan sinar yang dipantulkan tersebut seakan-akan datang melewati titik fokus di belakang permukaan cermin. Oleh sebab itu, cermin cembung bersifat divergen, lihat gambar 3.11(b).

Jarak dari vertek ke titik fokus untuk cermin bola disebut panjang fokus (f). Panjang fokus dikaitkan dengan jari-jari kelengkungan ditunjukkan dengan persamaan yang sangat sederhana, yaitu

$$f = \frac{R}{2} \quad (3.9)$$

Dalam keadaan tertentu, cermin cekung maupun cembung dapat membentuk bayangan maya yang tampak di belakang permukaan, seperti bayangan yang terbentuk pada cermin datar. Namun pada posisi tertentu, kedua cermin tersebut juga dapat membentuk suatu bayangan yang dapat dilihat pada sebuah layar.

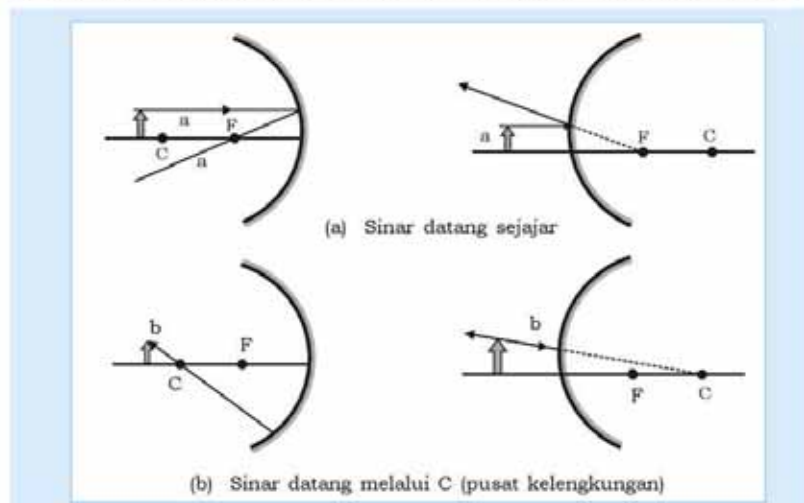
Bayangan yang bisa dilihat pada layar dinamakan bayangan nyata (sejati). Bayangan semacam ini mudah dilihat pada cermin yang bersifat konvergen. Perbedaan bayangan nyata dan maya biasanya hanya dibedakan pada bisa tidaknya dilihat di sebuah layar, bayangan maya tidak dapat dilihat pada layar.

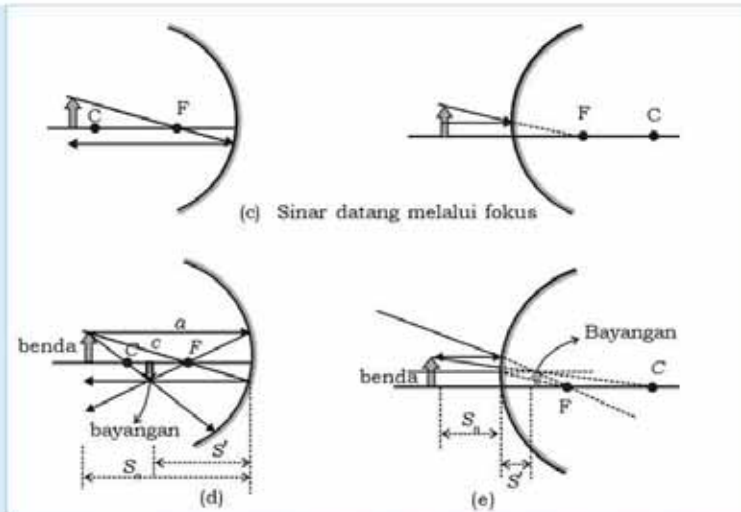
3. Diagram Sinar

Karakteristik pembentukan suatu bayangan dari cermin cekung dan cembung dapat ditentukan dengan menggunakan optik geometri. Kunci untuk melukis bayangan pada cermin cekung maupun cembung adalah sebagai berikut,

- Sinar paralel (sejajar) adalah sinar yang datang sejajar dengan sumbu optik dan akan dipantulkan melalui titik fokus, (semua sinar yang datang paralel dan dekat dengan sumbu optik).
- Jika sebuah sinar datang melalui pusat C (jari-jari kelengkungan), maka sinar akan dipantulkan kembali melalui pusat, sebab sinar datang melalui garis normal terhadap permukaan cermin.
- Sinar yang datang melalui titik fokus dipantulkan sejajar dengan sumbu optik.

Sinar-sinar tersebut dilukiskan seperti pada gambar 3.13 untuk cermin cekung maupun cembung. Benda yang digunakan adalah anak panah sehingga dengan mudah untuk membedakan jenis bayangannya, yaitu tegak atau terbalik. Bayangan yang terbentuk merupakan sebuah titik pertemuan yang dibentuk oleh sinar pantul.





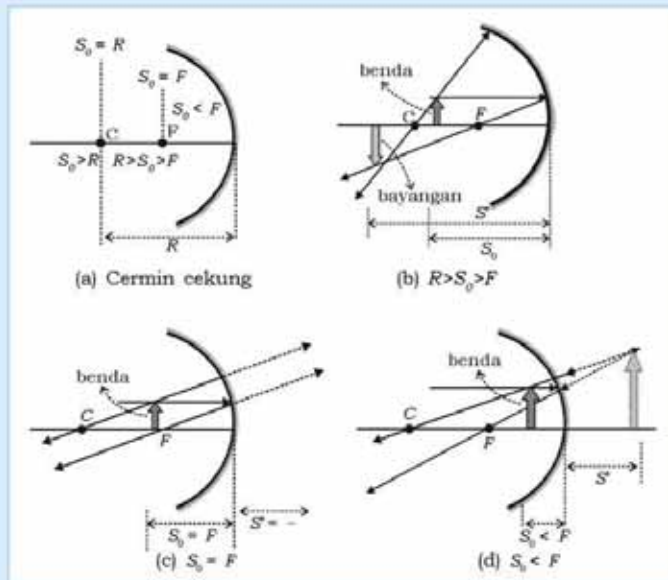
Gambar 3.13 Pembentukan bayangan pada cermin cekung dan cermin cembung

Gambar 3.13(d) menunjukkan sebuah cermin cekung dan sebuah benda pada jarak lebih besar dari jari-jari kelengkungan ($S_o > R$), terbentuk bayangan nyata. Jenis bayangan ini bisa dilihat pada layar. Sifat bayangan yang terbentuk pada cermin cekung seperti gambar 3.13(d) adalah bayangan nyata, diperkecil, dan terbalik.

Sinar yang dipantulkan dari cermin konvek bersifat divergen, lihat gambar 3.12(e). Proyeksi sinar yang ada di belakang cermin cembung untuk menemukan titik temu (*intersection*) dimana letak bayangan terbentuk dan menunjukkan bahwa bayangan yang terbentuk adalah bayangan maya. Bayangan ini sama dengan bayangan yang dibentuk oleh bayangan cermin datar, dimana bayangan tersebut tidak dapat diproyeksikan ke layar. Hal ini terjadi karena sinar yang dipantulkan di sembarang tempat dari cermin cembung adalah divergen, sehingga sebuah cermin divergen selalu membentuk bayangan maya.

Untuk cermin cekung yang bersifat konvergen mempunyai karakteristik bayangan yang berubah sesuai dengan jarak benda terhadap cermin. Ada dua titik yang perlu diperhatikan karena mengalami perubahan yang sangat dramatis, yaitu di titik C dan F (di pusat kelengkungan dan titik fokus). Titik-titik ini membagi tiga bagian seperti yang ditunjukkan pada gambar 3.11(a), yaitu:

$S_0 > R$, $R > S_0 > f$ dan $S_0 < f$. Mari kita perhatikan sebuah benda dalam bagian yang paling jauh dari cermin ($S_0 > R$) dan mendekat ke arah cermin.



Gambar 3.14 Sifat bayangan tergantung pada jarak benda

Pada gambar 3.14(a) memungkinkan keberadaan jarak benda menjadi 5 bagian, yaitu benda berada pada $S_0 > R$, pusat kelengkungan (C), $R > S_0 > f$, di titik fokus (F), dan $S_0 < f$.

- Jika benda berada pada jarak $S_0 > R$, maka sifat bayangan yang terbentuk adalah nyata, terbalik dan diperkecil (lukiskan!) di $R > S' > f$.
- Jika benda berada pada jarak $S_0 = R$, maka sifat bayangan yang terbentuk adalah nyata, terbalik dan sama besar (lukiskan!) di $S' = C$.
- Jika benda berada pada jarak $R > S_0 > f$, gambar 3.14(b), maka sifat bayangan yang terbentuk adalah nyata, terbalik dan diperbesar di $S' > R$.
- Jika benda berada pada jarak $S_0 = f$, gambar 3.14(c), maka bayangan yang terbentuk di tak terhingga.

- e. Jika benda berada pada jarak $S_0 < f$, gambar 3.14(d), maka sifat bayangan yang terbentuk adalah maya, tegak di belakang cermin dan diperbesar.

Posisi dan ukuran bayangan dapat ditentukan secara grafik dengan sinar diagram berskala. Namun lebih cepat dengan menggunakan metode analitik dimana jarak dan titik fokus dapat ditunjukkan dengan persamaan.

$$\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \quad (3.10)$$

$$S' = \frac{S_0 f}{S_0 - f} \quad (3.11)$$

Faktor perbesaran M dapat diturunkan secara analitik dan menghasilkan persamaan,

$$M = -\frac{S'}{S_0} \quad (3.12)$$

4. Penurunan Persamaan untuk Cermin Lengkung

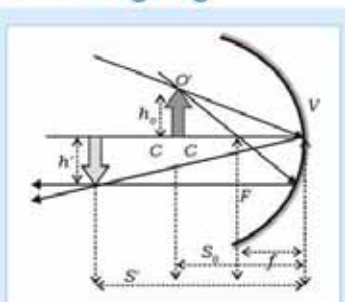
Perhatikan gambar 3.15, dimana jarak benda dan bayangan adalah S_0 dan S' dengan ketinggian benda dan bayangan adalah h_0 dan h' . Pada gambar 3.15 tampak bahwa segitiga ($O'VO$ dan $I'VI$) adalah sebangun sehingga kita dapat menuliskan,

$$\frac{h'}{h_0} = \frac{S'}{S_0} \quad (3.13)$$

Segitiga $O'FO$ dan VFA merupakan segitiga sebangun, mengapa? Kita perhatikan bahwa $VF = f$ dan $OF = S_0 - f$. Kemudian jika VA adalah h' (pendekatan karena cerminnya kecil jika dibandingkan dengan jari-jarinya).

$$\frac{h'}{h_0} = \frac{VF}{OF} = \frac{f}{S_0 - f} \quad (3.14)$$

Persamaan 3.13 dan 3.14 didapatkan, $\frac{S'}{S_0} = \frac{f}{S_0 - f} \Rightarrow S' = \frac{S_0 f}{S_0 - f}$ yang mana sama dengan persamaan 3.11. Untuk faktor perbesaran



Gambar 3.15 Penurunan persamaan untuk cermin lengkung

M kita dapat menggunakan persamaan 3.13 yaitu $M = -\frac{h'}{h_0} = -\frac{S'}{S_0}$, tanda negatif sebagai perjanjian. Perjanjian tersebut menyangkut beberapa hal, yaitu:

- Panjang fokus f atau R adalah positif untuk cermin cekung dan negatif untuk cermin cembung.
- Jarak benda S_0 selalu diambil positif.
- Jarak bayangan S' positif untuk bayangan nyata (terbentuk di sisi yang sama dengan posisi benda) dan negatif untuk bayangan maya (terbentuk di belakang cermin).
- Perbesaran mempunyai nilai positif untuk arah tegak ke atas dan negatif untuk bayangan yang arahnya terbalik terhadap bendanya.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 3.3

Sebuah cermin cembung mempunyai jari-jari kelengkungan 30 cm. Jika sebuah benda ditempatkan pada jarak a) 45 cm, b) 20 cm dan c) 10 cm dari permukaan cermin, dimana letak bayangan yang terbentuk dan bagaimana karakteristiknya?

Penyelesaian:

Diketahui:

$R = 30$ cm sehingga $f = 15$ cm

Ditanya:

- S' dan karakteristik bayangan jika $S_0 = 45$ cm?
- S' dan karakteristik bayangan jika $S_0 = 20$ cm?
- S' dan karakteristik bayangan jika $S_0 = 10$ cm?

Jawab:

- a. $S_0 > R$

$$\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R} \Rightarrow \frac{1}{45 \text{ cm}} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{15 \text{ cm}} \Rightarrow S' = +22,5 \text{ cm}$$

$$\text{Perbesaran, } M = -\frac{S'}{S_0} = -\frac{22,5 \text{ cm}}{45 \text{ cm}} = -\frac{1}{2}$$

Jadi, bayangan yang terbentuk adalah nyata, terbalik (M negatif) dan diperkecil (setengah dari benda).

b. $R > S_0 > f$

$$S' = \frac{S_0 f}{S_0 - f} = \frac{(20 \text{ cm})(15 \text{ cm})}{(20 - 15) \text{ cm}} = 60 \text{ cm dan}$$

$$M = -\frac{S'}{S_0} = -\frac{60 \text{ cm}}{20 \text{ cm}} = -3,0$$

Dari hasil perhitungan dapat disimpulkan bahwa bayangan yang terbentuk adalah bersifat nyata, terbalik dan diperbesar tiga kali dari bendanya.

c. $S_0 < f$

Benda berada di dalam panjang fokus,

$$S' = \frac{S_0 f}{S_0 - f} = \frac{(10 \text{ cm})(15 \text{ cm})}{(10 - 15) \text{ cm}} = -30 \text{ cm}$$

$$M = -\frac{S'}{S_0} = -\frac{(-30 \text{ cm})}{10 \text{ cm}} = +3,0 \text{ cm}$$

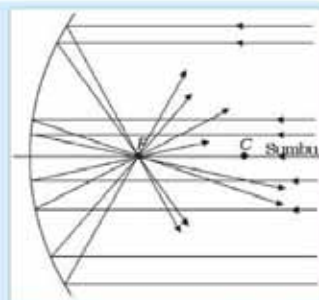
Dari hasil perhitungan disimpulkan bahwa bayangan yang terbentuk adalah maya, tegak (nilai positif) dan diperbesar 3 kali dari bendanya.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan vokasional** kalian, kerjakan tugas berikut!

Tugas 3.1

Buatlah lukisan pembentukan bayangan untuk jawaban a-c!

Perlu diketahui bahwa perhitungan dengan menggunakan persamaan 3.10-3.12 hanya berlaku untuk sinar yang dekat dengan sumbu optik dan sudut pantul kecil. Jika kondisi ini tidak terpenuhi maka bayangan yang terbentuk akan kabur (di luar fokus) atau terdistorsi, karena tidak semua sinar akan terfokus pada bidang yang sama. Seperti pada gambar



Gambar 3.16 Aberasi optik pada cermin bola (cermin cekung)

3.16, sinar-sinar datang sejajar dengan sumbu optik namun tidak semua dekat dengan sumbu, akibatnya tidak semua terfokuskan melalui titik fokus. Kejadian seperti ini disebut aberasi.

Aberasi tidak akan pernah terjadi pada cermin parabola. Semua sinar sejajar dengan sumbu optik mempunyai titik fokus yang sama. Dengan alasan ini semua cermin parabola digunakan untuk teleskop astronomi. Namun secara teknologi pembuatan cermin parabola lebih sulit daripada cermin bola, sehingga harganya lebih mahal.

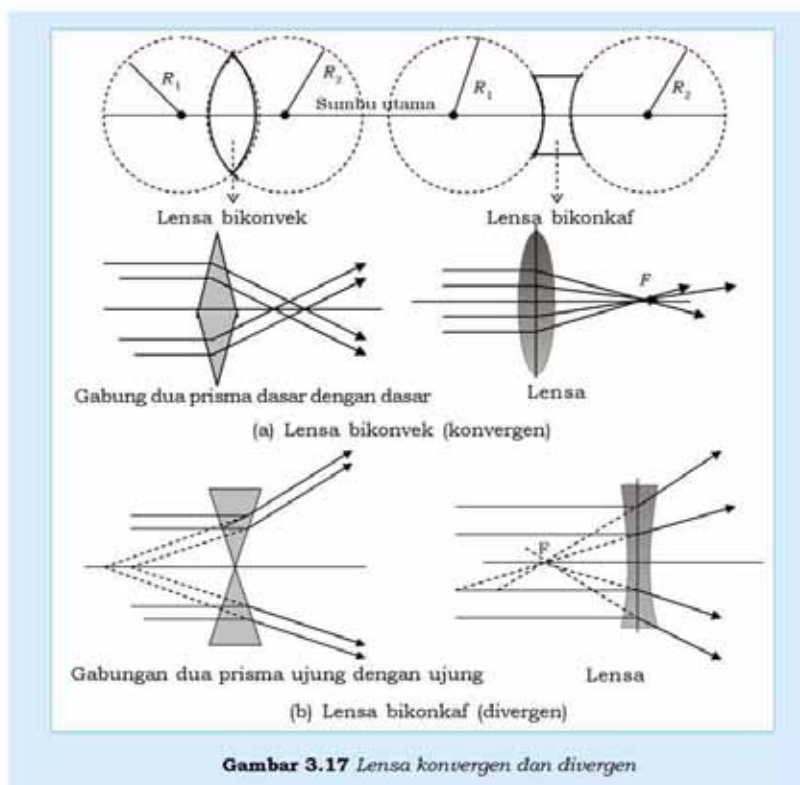
5. Lensa

Kata lensa berasal dari bahasa latin yang berarti lentil, yaitu potongan atau serpihan gelas yang berbentuk kurva (lengkung). Lensa optik dibuat dari bahan transparan (biasanya gelas tetapi ada juga yang terbuat dari plastik atau kristal). Satu atau kedua permukaannya biasanya mempunyai bentuk tertentu, misalnya untuk lensa bikonvek kedua permukaannya mempunyai bentuk cembung dan lensa bikonkaf adalah lensa yang kedua permukaannya berbentuk cekung, lihat gambar 3.17.

Sifat lensa adalah membiaskan cahaya atau sinar yang melewatinya. Jika sinar melewati lensa maka sinar tersebut akan dibiaskan sesuai dengan hukum pembiasan. Untuk analisis pembiasan bisa menempatkan dua buah prisma seperti terlihat pada gambar 3.17(a), yaitu penempatan antara dasar kedua prisma. Lensa bikonvek bersifat konvergen, yaitu sinar-sinar datang sejajar terhadap sumbu optik akan dibiaskan melalui titik fokus pada sisi yang berlawanan terhadap lensa. Ini bisa kalian lakukan pada lensa pembesar dimana cahaya matahari bisa difokuskan atau dipusatkan di titik fokusnya, sehingga energi yang terpusat ini dapat membakar benda atau kertas.

Sebaliknya untuk lensa bikonkaf yang mempunyai sifat divergen, lensa ini dapat dibentuk dengan menempatkan dua buah prisma dengan menyatukan ujung-ujung prisma, lihat gambar 3.17(b). Jika sinar sejajar datang mengenai lensa, maka sinar akan dibiaskan, dimana sinar bias seolah-olah datang dari titik fokus yang sama dengan sinar datang, lihat gambar 3.17(b).

Ada beberapa model atau jenis lensa yang bersifat konvergen maupun divergen, gambar 3.18. Lensa minikus adalah lensa yang biasa digunakan untuk kacamata koreksi. Lensa konvergen biasanya lebih tebal di bagian tengah daripada di bagian ujung. Sedangkan lensa divergen, di bagian tengah lebih tipis daripada bagian ujungnya.



Gambar 3.17 Lensa konvergen dan divergen

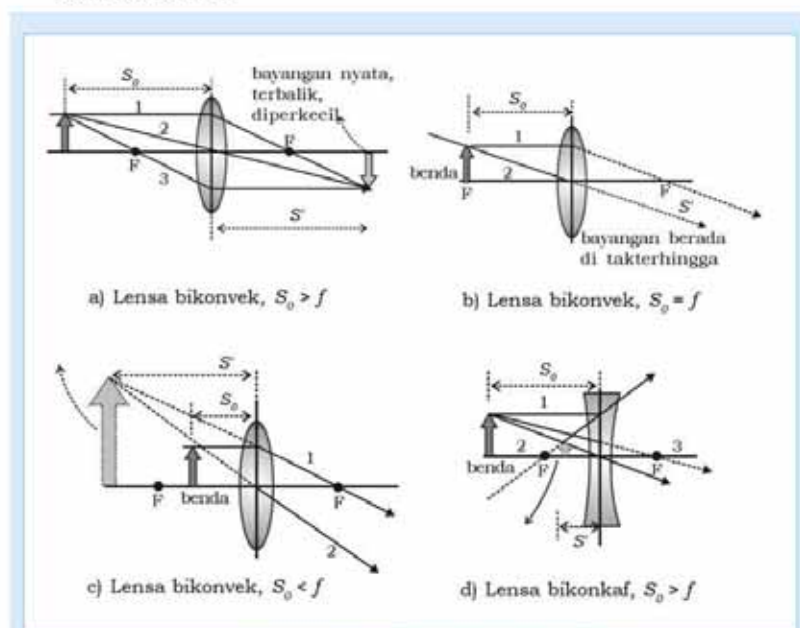
Jika lensa cukup tebal, maka analisisnya lebih kompleks dibandingkan dengan lensa tipis, di mana pergeseran pembiasan dari sinar yang ditransmisikan bisa diabaikan. Untuk pembicaraan dalam bab ini kita membatasi pada lensa yang tipis.

Seperti cermin bola, lensa dengan geometri bola untuk tiap permukaan mempunyai pusat kelengkungan, jari-jari kelengkungan, titik fokus, dan panjang fokus. Jika setiap permukaan mempunyai jari-jari kelengkungan sama, maka kedua sisi permukaan mempunyai panjang fokus yang sama. Namun perlu diingat bahwa untuk lensa bola $f \neq \frac{R}{2}$, tidak seperti pada cermin bola.

Aturan umum dalam melukis jalannya sinar untuk lensa hampir sama dengan cermin, tetapi beda arah. Sisi yang berlawanan dari lensa secara umum dibedakan sebagai benda atau bayangan

yang terbentuk. Untuk bayangan nyata, posisinya berlawanan dengan posisi benda. Sinar dari titik benda digambarkan sebagai berikut:

1. Sinar datang sejajar sumbu utama dibiaskan melalui titik fokus.
2. Sinar datang melalui pusat lensa, sinar akan diteruskan.
3. Sinar datang melalui titik fokus dibiaskan sejajar terhadap sumbu utama.



Gambar 3.18 Diagram sinar pada lensa

Sinar-sinar yang dimaksud pada 1-3 untuk lensa konvergen dan divergen dilukiskan seperti pada gambar 3.18. Seperti pada cermin, kita hanya membutuhkan dua sinar datang untuk melukiskan bayangan yang terbentuk, cukup sinar datang yang sejajar sumbu lensa dan sinar datang yang melalui pusat lensa (walaupun sebaiknya ada tiga sinar untuk mengecek kebenaran diagram yang dapat kalian buat untuk melukiskan bayangan yang terbentuk).

Untuk sebuah lensa, bayangan yang dibentuk nyata jika bayangan pada posisi yang berlawanan terhadap benda, lihat gambar 3.18(b). dan bayangannya maya jika bayangan terbentuk pada

posisi yang sama terhadap benda, lihat gambar 3.18(c). Perhatikan gambar 3.18(d). Pengertian bayangan nyata dan maya pada lensa sama seperti pada cermin, di mana bayangan nyata dapat ditangkap oleh layar sedangkan bayangan maya tidak dapat ditangkap pada layar. Seperti pada cermin konvergen, lensa konvergen juga dibagi menjadi beberapa bagian, yaitu: jarak benda $S_0 = 2f$ untuk lensa konvergen mempunyai kesamaan terhadap $S_0 = R$ untuk cermin konvergen. Namun untuk jarak pusat kelengkungan sebuah lensa konvergen tidak sama dengan $f \neq \frac{R}{2}$ seperti pada cermin. Jarak bayangan dapat juga ditemukan secara analitik. Persamaan untuk lensa bikonvek simetris yang tipis dan lensa bikonkaf adalah identik dengan cermin bola. Persamaan untuk lensa tipis,

$$\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} \Rightarrow S' = \frac{S_0 f}{S_0 - f} \quad (3.15)$$

Faktor perbesaran M ,

$$M = -\frac{S'}{S_0} \quad (3.16)$$

Lensa tipis adalah satu jenis lensa dari lensa tebal yang mana ketebalannya dianggap kecil dibandingkan dengan panjang fokusnya. Konvensi pada lensa tipis mirip dengan cermin bola:

1. panjang fokus (f) adalah positif untuk lensa konvergen (kadang-kadang disebut lensa positif) dan negatif untuk lensa divergen (kadang-kadang disebut lensa negatif),
2. jarak benda (S_0) selalu diambil positif untuk lensa tunggal,
3. jarak bayangan (S') adalah positif untuk bayangan nyata (yang lokasinya berlawanan terhadap benda dari lensa) dan negatif untuk bayangan maya (yang mana lokasinya sama dengan lokasi benda dari lensa),
4. perbesaran adalah positif untuk bayangan tegak dan negatif untuk bayangan yang terbalik.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 3.4

Sebuah lensa bikonvek mempunyai panjang fokus 12 cm. Dimana bayangan akan terbentuk dan bagaimana sifat-sifat bayangan tersebut jika benda, a) berada 18 cm dari lensa dan b) berada 4 cm dari lensa?

Penyelesaian:

Data yang didapatkan dari soal adalah:

Diketahui:

$$f = 12 \text{ cm}$$

$$S_{01} = 18 \text{ cm}$$

$$S_{02} = 4 \text{ cm}$$

Ditanya:

S' dan sifat bayangan yang terbentuk?

Jawab:

- a. Dengan mendasarkan pada persamaan 3.15,

$$\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{1}{18 \text{ cm}} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{12 \text{ cm}} \Rightarrow S' = 36 \text{ cm}$$

$$M = -\frac{S'}{S_0} = -\frac{36 \text{ cm}}{18 \text{ cm}} = -2$$

Bayangan yang terbentuk adalah nyata (S' mempunyai nilai positif), terbalik (M adalah negatif), dan diperbesar dua kali ($|M|=2$).

- b. Dengan menggunakan persamaan 3.15,

$$S' = \frac{S_0 f}{S_0 - f} = \frac{(4 \text{ cm})(12 \text{ cm})}{(4 - 12) \text{ cm}} = -6 \text{ cm}$$

$$M = -\frac{S'}{S_0} = -\frac{(-6 \text{ cm})}{4 \text{ cm}} = 1,5$$

Bayangan yang terbentuk adalah maya (S' mempunyai nilai negatif), tegak (M adalah positif), dan diperbesar dua kali ($|M|=1,5$).

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, kerjakanlah tugas berikut!

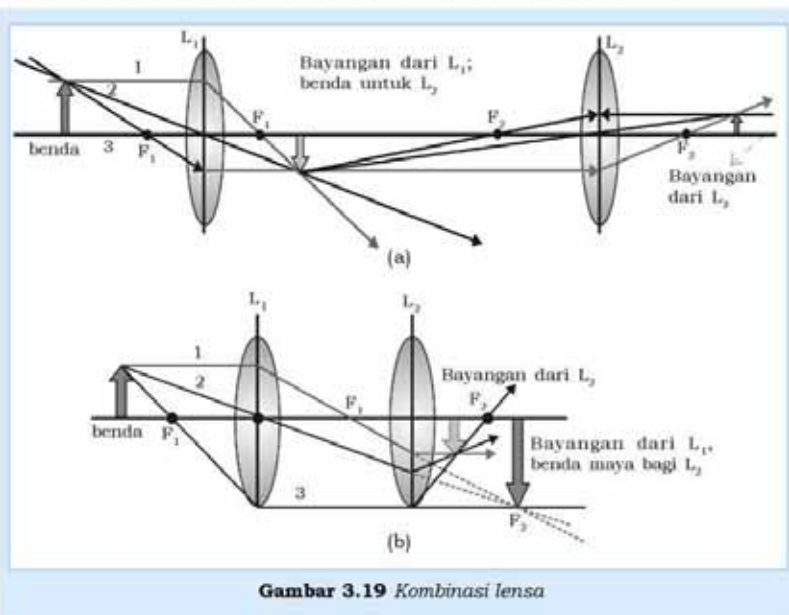
Tugas 3.2

Lukiskan jalannya sinar-sinar pada contoh soal di atas dengan skala yang sudah kalian dapatkan!

6. Kombinasi Lensa

Banyak alat optik, seperti mikroskop dan teleskop menggunakan kombinasi lensa atau sistem lensa gabungan. Jika dua atau lebih lensa digunakan dalam kombinasi, keseluruhan bayangan yang terbentuk mungkin ditentukan dengan memperhatikan masing-masing lensa. Yaitu, bayangan yang terbentuk oleh lensa pertama dijadikan benda untuk lensa kedua, gambar 3.19(a). Namun jika kedua lensa mempunyai posisi yang sangat dekat sekali, maka bayangan oleh lensa pertama tidak akan terbentuk sebelum sinar melewati lensa kedua gambar 3.19(b), kemudian suatu modifikasi harus dibuat suatu konvensi tanda. Dalam keadaan ini bayangan dari lensa pertama diperlakukan sebagai benda maya untuk lensa kedua dan jarak benda untuk hal ini diambil tanda negatif dalam penggunaan persamaan lensa.

Perbesaran total (M) untuk sebuah lensa gabungan adalah hasil perkalian dari masing-masing perbesaran (harga mutlak) lensa. Contoh: dua lensa gabungan, lihat gambar 3.19, $M_t = |M_1| \times |M_2|$. Perlu hati-hati bahwa tidak semua lensa bersifat sferis.



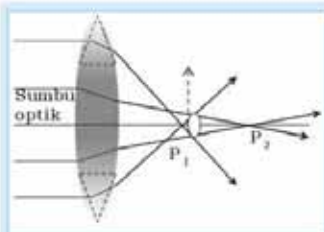
Gambar 3.19 Kombinasi lensa

7. Aberasi Lensa

a. Aberasi sferis

Secara umum, cermin atau lensa dimana sinar-sinar datang sejajar dekat sumbu optik akan dipantulkan atau dibiaskan melalui titik fokus. Namun lensa konvergen seperti cermin bola, menunjukkan adanya aberasi sferis dimana sinar datang sejajar yang jauh dari sumbu optik tidak dibiaskan melalui titik fokus, lihat gambar 3.20.

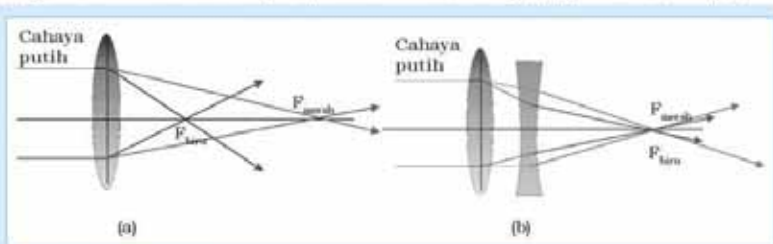
Aberasi sferis dapat diminimalkan dengan menggunakan lubang kecil untuk mengurangi daerah efektif dari lensa sehingga hanya sinar yang dekat dengan sumbu optik yang akan dibiaskan (ditransmisikan). Juga bisa menggunakan kombinasi dua lensa konvergen dan divergen.



Gambar 3.20 Aberasi lensa

b. Aberasi kromatik

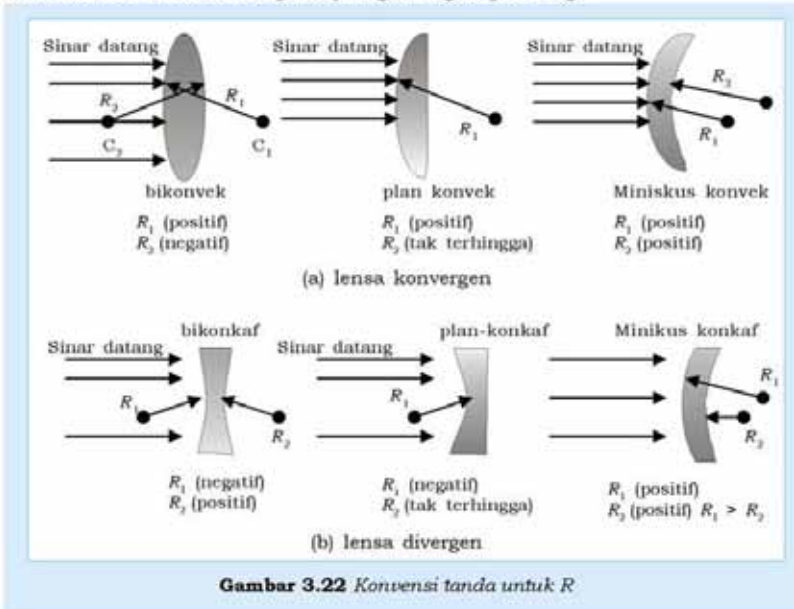
Aberasi kromatik adalah suatu efek yang terjadi karena pengaruh indeks bias dari bahan lensa, sehingga terjadi dispersi (uraian warna). Jika cahaya putih dikenakan pada lensa tersebut, maka sinar yang transmisi mempunyai perbedaan panjang gelombang (warna), sehingga tidak pada satu titik fokus, lihat gambar 3.21. Aberasi jenis ini bisa diperbaiki dengan menggunakan lensa gabungan yang mempunyai perbedaan bahan (material) seperti *gelas crown* dan *gelas flint*. Pilihan lensa gabungan sedemikian hingga dispersi yang dihasilkan dapat dikompensasi dengan penyebabnya (lensa yang menyebabkan dispersi yang berlawanan dengan lensa pertama). Sistem ini disebut *akromatik doublet* (tanpa warna) dimana bayangan yang terbentuk dari sinar yang terseleksi akan tepat pada titik fokusnya, gambar 3.21(b).



Gambar 3.21 Aberasi kromatik: (a) belum diperbaiki (koreksi) (b) diperbaiki dengan lensa kombinasi

8. Deskripsi Lensa Tipis

Sejauh ini kita hanya memperhatikan sifat simetris dari lensa bikonvek dan bikonkaf, yaitu dengan jari-jari kelengkungan yang sama. Bagaimanapun, ada lensa konvergen dan divergen yang mempunyai permukaan dengan jari-jari yang berbeda, lihat gambar 3.22. Tentunya dengan perbedaan jari-jari permukaan lensa, memberikan analisis optik yang sangat penting.



Secara umum panjang fokus untuk lensa tipis di udara ($n_{\text{udara}} = 1$) diberikan oleh persamaan yang disebut persamaan pembuat lensa:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.17)$$

di mana n adalah indeks bias lensa. Jika lensa berada pada zat cair, maka pernyataan dalam kurung menjadi $\left[\left(\frac{n}{n_m} \right) - 1 \right]$ di mana n_m adalah indeks bias dalam medium zat cair. (Jelaskan mengapa lensa konvergen jika dimasukkan ke dalam air menjadi lensa divergen!). Jika $n_m > n$ maka harga f negatif.

Persamaan 3.17, n adalah indeks bias dari lensa, R_1 dan R_2 adalah jari-jari kelengkungan untuk permukaan bagian depan dan permukaan bagian belakang. Persamaan 3.22 juga menunjukkan bahwa panjang fokus (f) tidak lagi seperti pada cermin, yaitu $f \neq \frac{R}{2}$. Untuk sebuah lensa bikonvek, $|R_1| = |R_2| = R$, yang mana berlaku $f = \frac{R}{2}$ dengan syarat, jika harga $n = 2$ yang mana lebih besar dari harga yang telah diketahui untuk gelas.

Kreasi Fisika

Pada tahun 1609, Galileo mendapat berita mengenai teleskop yang masa itu dibuat di negeri Belanda, sehingga segeralah ia membuat teleskop sendiri. Teleskop ini memiliki dua buah lensa - sebuah lensa objektif cembung dan sebuah lensa cekung tempat mengintai. Kalian telah mempelajari tentang lensa, oleh karena itu cobalah untuk mengaplikasikannya dengan membuat teleskop. Apabila pada abad ke-16 Galileo telah dapat membuat teleskop, pasti sekarang kalian juga bisa, meskipun hanya teleskop sederhana. Teleskop tersebut dapat digunakan untuk mengamati bintang-bintang di angkasa. Berkreasilah dengan mengubah posisi lensa untuk mendapatkan bayangan sejelas mungkin.



Hubungan antara $\frac{1}{f}$ dapat dinyatakan dalam variabel indeks bias dan jari-jari kelengkungan lensa. Jika jari-jari kelengkungan dinyatakan dalam meter maka f mempunyai satuan meter. Apabila panjang fokus dinyatakan dalam meter, kuat lensa (P) dinyatakan dalam dioptri. Kuat lensa dapat ditulis dalam bentuk persamaan

$$P = \frac{1}{f \text{ (meter)}} \quad (3.18)$$

Lensa konvergen dan divergen mengacu pada lensa positif dan negatif, sehingga jika seorang menggunakan kacamata +2 dioptri, artinya bahwa kacamata tersebut adalah kacamata dengan lensa konvergen dengan panjang fokusnya adalah,

$$f = \frac{1}{P} = \frac{1}{2 \text{ dioptri}} = 0,50 \text{ m} = 50 \text{ cm}$$

Semakin besar harga kuat lensa dalam dioptri, semakin kecil panjang fokus dan lebih konvergen atau divergen.

Contoh Soal 3.5

Sebuah lensa plankonvek tipis terbuat dari *gelas crown* yang mempunyai indek bias 1,50. Jika jari-jari kelengkungan permukaan lensa konvek adalah 20 cm, berapa panjang fokus lensa jika sinar datang pada

- permukaan konvek?
- permukaan datar (plan)?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$n = 1,5$$

- $R_1 = +20$ cm dan $R_2 =$ tak terhingga
- $R_1 =$ tak terhingga, $R_2 = -20$ cm

Ditanya:

- f ?
- f ?

Jawab:

- Permukaan pertama dalam kasus ini adalah permukaan konvek, sehingga jari-jarinya adalah R_1 dan mempunyai nilai positif. Permukaan kedua datar sehingga R_2 adalah tak terhingga (karena tak terhingga maka tidak mempunyai nilai positif atau negatif).

$$\begin{aligned}\frac{1}{f} &= (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = (1,5-1) \left(\frac{1}{20 \text{ cm}} - \frac{1}{\infty} \right) \\ &= \frac{0,5}{20 \text{ cm}} \Rightarrow f = 40 \text{ cm}\end{aligned}$$

Karena f mempunyai nilai positif, maka lensa yang digunakan bersifat konvergen dan sinar-sinar datang yang sejajar dengan sumbu optik akan dibiaskan melalui titik fokus yang berjarak 40 cm di belakang permukaan datar.

- Kasus yang kedua, sinar-sinar datang pertama mengenai permukaan lensa yang datar, sehingga R_1 adalah tak terhingga, sedang untuk R_2 adalah -20 cm.

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right) = (1,5-1) \left(\frac{1}{\infty} - \frac{1}{-20 \text{ cm}} \right)$$

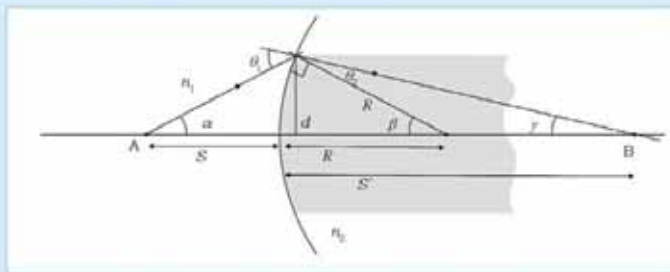
$$= \frac{0,5}{20 \text{ cm}} \Rightarrow f = 40 \text{ cm}$$

Oleh karena itu lensa ini bersifat konvergen, karena f positif, mungkin kalian tidak mengharapkan hasil seperti ini karena R_1 adalah datar.

Tugas 3.3

Lakukan perhitungan seperti contoh soal 3.5 untuk menentukan panjang fokus jika dikenakan pada lensa bikonvek!

3. Persamaan Pembentukan lensa



Gambar 3.23 Pembentukan bayangan pada bidang lengkung

Pada gambar 3.23 ditunjukkan jalannya sinar dalam pembentukan bayangan oleh permukaan benda bening yang lengkung. Sebuah benda diletakkan di depan permukaan lengkung sejauh S . Dari hukum Snellius untuk pembiasan diperoleh

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2. \quad (3.19a)$$

Dari gambar 3.23, kalian dapat memperoleh $\theta_1 = \alpha + \beta$ dan $\beta = \theta_2 + \gamma$. Karena θ_1, θ_2 kecil maka $\sin \theta_1 = \theta_1$, $\sin \theta_2 = \theta_2$, $\tan \alpha = \frac{d}{S}$, $\tan \beta = \frac{d}{R}$, $\tan \gamma = \frac{d}{S'}$.

Maka $\theta_1 \approx \frac{d}{S} + \frac{d}{S}$ dan $\theta_2 = \beta - \gamma = \frac{d}{R} - \frac{d}{S'}$

Persamaan 3.19(a) menjadi $n_1 \left(\frac{d}{S} + \frac{d}{R} \right) = n_2 \left(\frac{d}{R} - \frac{d}{S'} \right)$

$$\therefore \frac{n_1}{S} + \frac{n_2}{S'} = \frac{(n_2 - n_1)}{R} \quad (3.19b)$$

Brilian

1. Benda bening yang dibatasi 2 bidang lengkung ini disebut lensa
2. C' adalah bayangan A yang dibentuk lensa.

Jabarkan pers pembentukan bayangan oleh lensa: $\frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$

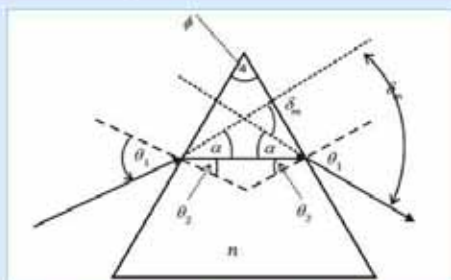
dengan menggunakan persamaan 3.19(a) untuk bidang lengkung (I) dan persamaan

3.19(b) untuk bidang lengkung (II).

G. Pembiasan pada Prisma

Prisma sering digunakan untuk mengukur indeks bias benda padat yang transparan. Walaupun kita tidak membuktikan disini, namun pengertian tentang sudut deviasi minimum, δ_m , perlu diketahui. Sudut δ_m terbentuk dari perpanjangan sudut datang θ_p dimana sinar bias di dalam prisma membentuk sudut yang sama dengan sudut α , lihat gambar 3.24

Berdasarkan gambar 3.24, secara geometris kita dapat menentukan indeks bias prisma, n .



Gambar 3.24 Sinar melewati prisma pada sudut δ_m

Dari gambar 3.25, didapatkan hubungan,

$$\theta_1 = \theta_2 + \alpha = \frac{\phi}{2} + \frac{\delta_m}{2} = \frac{\phi + \delta_m}{2} \quad (3.20)$$

Hukum Snellius, $\sin \theta_1 = n \sin \theta_2$

$$\sin \left(\frac{\phi + \delta_m}{2} \right) = n \sin \left(\frac{\phi}{2} \right) \Rightarrow n = \frac{\sin \left(\frac{\phi + \delta_m}{2} \right)}{\sin \left(\frac{\phi}{2} \right)} \quad (3.21)$$

Dari persamaan 3.21 kita dapat menentukan besarnya indeks bias, n , suatu prisma dengan mengukur sudut deviasi minimum, δ_m dan sudut θ dari prisma secara langsung lewat suatu percobaan. Untuk menghitung nilai n dari prisma, lakukan kegiatan 3.1.

Kegiatan 3.1

Tujuan:

Menentukan besar indeks bias prisma.

Alat dan bahan:

1. 1 buah prisma $\beta = 45^\circ$.
2. 1 buah busur derajat.
3. 1 lembar kertas putih dan kertas hitam.
4. 1 lembar papan lunak/triplek ukuran $\pm 30 \times 30$ cm.
5. 1 pak paku payung.
6. 1 lampu senter atau *pointer laser*.

Prosedur:

1. Letakkan prisma pada kertas putih yang telah siap pada papan lunak dengan paku payung!
2. Gambarkan bentuk prisma pada kertas putih tersebut!
3. Tutuplah senter dengan kertas hitam, kemudian lubang pada tengahnya!
4. Arahkan senter yang telah dihidupkan, beri tanda pada sinar yang keluar dengan pensil! (lihat gambar 3.26)
5. Angkat prisma dan ukurlah δ (sudut deviasi)!
6. Ulangi dengan sudut datang yang berbeda sehingga didapatkan sudut yang berbeda!
7. Salinlah tabel 3.2 berikut ke dalam buku tugas kalian dan masukkan hasil pengamatan kalian!

Tabel 3.2 Hasil Pengamatan

Sudut θ	Sudut δ	Sin $(\phi/2)=A$	Sin $[(\phi+\delta)/2]=B$	$n=(B/A)$
20
25
30
35
40
45
60

8. Dari data yang ada, tentukan nilai sudut δ yang terkecil. Bilamana itu terjadi?
9. Hitung nilai n prisma?

Analisis dan kesimpulan

Pada persamaan 3.21, dapat dituliskan kembali menjadi sin

$$\left(\frac{\delta_m + \beta}{2} \right) = n \sin \frac{\beta}{2}, \text{ di mana } (\phi) = \beta. \text{ Untuk sudut yang sangat}$$

kecil, perbandingan sinus dapat diganti dengan perbandingan sudutnya, maka $\delta_m = (n - 1)\beta$. Buktikan dan bandingkan nilai n yang didapat dari persamaan 3.21. Berilah alasan yang mungkin timbul dari hasil perhitungan kedua persamaan tersebut sebagai kesimpulan.

Rangkuman

1. Pada peristiwa pemantulan cahaya berlaku $\theta_i = \theta_p$
2. Pada peristiwa pembiasan cahaya berlaku $\frac{n_2}{n_1} = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r}$
3. Hubungan antara indek bias, panjang gelombang dan kecepatan $n = \frac{c}{v} = \frac{\lambda}{\lambda_m}$
4. Sifat bayangan pada cermin datar adalah maya, tegak, sama besar dan berkebalikan dengan benda.

5. Pada pemantulan di cermin sferis, berlaku

$$\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} = \frac{2}{R}$$

6. Faktor perbesaran diturunkan secara analitik dan

menghasilkan persamaan $M = \frac{S'}{S_0} = \frac{h'}{h_0}$

7. Persamaan untuk lensa tipis (bikonkaf dan bikonveks)

adalah $\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{f} \rightarrow S' = \frac{S_0 f}{S_0 - f}$

8. Faktor perbesaran pada lensa adalah $M = -\frac{S'}{S_0}$

9. Kuat lensa dinyatakan dalam persamaan, $P = \frac{1}{f(\text{meter})}$

10. Persamaan untuk lensa gabungan adalah

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

11. Besarnya sudut deviasi minimum dinyatakan dengan

$$\sin \left(\frac{\phi + \delta_m}{2} \right) = n \sin \left(\frac{\phi}{2} \right)$$

Uji Kompetensi

- A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

1. Berkas cahaya datang dari medium A ke medium B dengan sudut datang 45° dan dibiaskan dengan sudut sebesar 30° . Indeks bias relatif medium A ke medium B adalah

a. $\frac{1}{2}$

b. $\frac{1}{2}\sqrt{2}$

c. $\frac{1}{2}\sqrt{3}$

d. $\sqrt{2}$

e. 2

2. Seberkas sinar datang pada permukaan air dengan sudut datang 45° , kemudian keluar dari permukaan air seperti terlihat pada gambar. Jika indeks bias air $4/3$, maka sudut θ adalah



a. 30°

b. 45°

c. 60°

d. $\arcsin 1,33$

e. $\arcsin 3/4$

3. Berikut ini sifat-sifat sinar cembung, **kecuali**

- berkas sinar sejajar sumbu utama dipantulkan seolah-olah berasal dari titik api
- berkas sinar menuju titik api dipantulkan sejajar sumbu utama
- berkas sinar yang menuju titik pusat kelengkungan cermin dipantulkan seolah-olah dari titik itu juga
- mengumpulkan semua berkas sinar sejajar yang diterima
- membentuk bayangan semu dari benda di muka cermin

4. Sebuah cermin cekung mempunyai titik fokus 2 meter digunakan untuk mengamati bulan purnama yang diameternya 3200 km. Jika jarak bulan ke bumi adalah 340.000 km, maka diameter bayangan bulan adalah

a. 1,88 km

b. 1,88 dam

c. 1,88 m

d. 1,88 dm

e. 1,88 cm

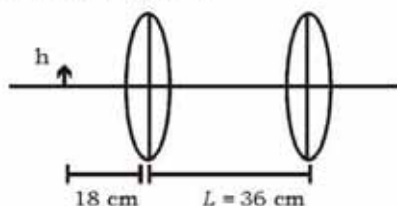
5. Bila suatu sinar sejajar jatuh pada lensa bikonkaf, maka sinar yang meninggalkan lensa itu

a. selalu konvergen

b. selalu divergen

c. mungkin konvergen atau divergen, tergantung dari sudut datang

- d. akan dipantulkan melalui titik api
 - e. akan dipantulkan secara sempurna
6. Diketahui indeks bias udara besarnya 1, indeks bias air sama dengan $\frac{4}{3}$ dan indeks bias bahan suatu lensa tipis adalah $\frac{3}{2}$. Lensa tipis tersebut di udara memiliki kuat lensa 5 dioptri. Kekuatan lensa tersebut di dalam air adalah
- a. dioptri
 - b. dioptri
 - c. dioptri
 - d. dioptri
 - e. tidak ada jawaban yang benar
7. Sebuah lensa konvergen ketika di udara mempunyai jarak fokus 8 cm. Lensa tersebut terbuat dari gelas ($n = 1,5$). Apabila lensa tersebut dicelupkan ke dalam zat cair, ternyata jarak fokusnya menjadi 27 cm. Nilai indeks bias zat tersebut adalah
- a. 1,11
 - b. 1,31
 - c. 1,33
 - d. 1,42
 - e. 1,5
8. Jika dua buah lensa tipis yang berjarak fokus 6 cm dan 18 cm digabungkan, maka kekuatan lensa gabungan (dalam dioptri) adalah
- a. 10
 - b. 11,11
 - c. 12,14
 - d. 13,2
 - e. 10,24
9. Perhatikan gambar!

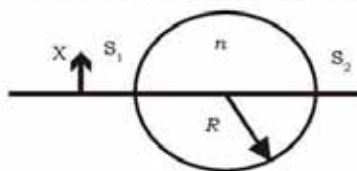


Apabila diketahui panjang benda $h = 2 \text{ cm}$, $f_A = 4 \text{ cm}$, maka jarak bayangan dan perbesaran yang dialami oleh benda adalah

- a. 3 cm dan 0,5
 - b. 3,6 cm dan 1,5
 - c. 3,5 cm dan 4
 - d. 4 cm dan 3
 - e. 3 cm dan 2
10. $b = 25^\circ$ mempunyai indeks bias 1,56. Sudut sinar yang datang pada prisma tersebut agar sinar yang keluar tegak lurus permukaan sisi prisma yang lain adalah
- a. $52,14^\circ$
 - b. $24,51^\circ$
 - c. $25,41^\circ$
 - d. $41,25^\circ$
 - e. $41,52^\circ$

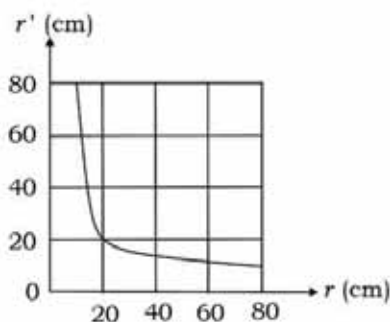
B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Suatu sistem optik terdiri dari dua permukaan sferis yang membentuk bola berjari-jari $R = 10$ cm. Indeks bias bahan bola tersebut adalah $3/2$. Sebuah benda X terletak 6 cm di depan S_1 (lihat gambar!). Hitung bayangan benda X!



2. Dua buah cermin datar sejajar dan berhadapan berjarak 6 cm satu sama lain. Sebuah titik berada di tengah-tengah dua cermin itu dan sinar dari titik benda dipantulkan berturut-turut oleh dua cermin sampai membentuk bayangan terakhir. Hitunglah berapa kali pemantulan sinar sehingga jarak titik benda dengan bayangan terakhir 36 cm!
3. Sebuah lensa gabungan tersusun dari dua cermin cembung. Jika jarak titik api kedua lensa tersebut masing-masing 100 cm dan 25 cm, hitunglah kekuatan lensa itu!

4. Sebuah lensa membentuk bayangan nyata. jarak objek ke lensa adalah x cm dan jarak bayangan ke lensa y cm. Grafik hubungan antara x dan y di tunjukkan di bawah
Bagaimanakah sifat lensa dan panjang titik fokus lensa tersebut?



5. Sebuah prisma kaca flinta mempunyai sudut pembias 20° . Dalam keadaan deviasi minimum, hitunglah besarnya sudut pembias antara sinar merah dengan sinar biru jika diketahui indeks bias flinta untuk sinar tersebut!
 $n_{\text{merah}} = 1,644$ dan $n_{\text{biru}} = 1,664$

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab IV

Cahaya sebagai Gelombang

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat mendeskripsikan gejala dan ciri – ciri cahaya serta menerapkan konsep dan prinsip cahaya dalam teknologi.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Interferensi
2. Difraksi
3. Polarisasi

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

1. Interferensi pada celah ganda
2. Interferensi pada lapisan tipis
3. Difraksi
4. Polarisasi

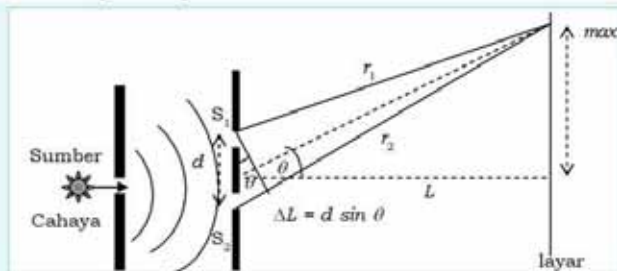
Fenomena gelombang dapat ditunjukkan lewat konsep pemantulan, pembiasan, difraksi dan interferensi yang sudah kalian pelajari pada bab I dan bab II tentang gelombang mekanik (gelombang tali dan bunyi), di mana gelombang menjalar diperlukan medium. Sebaliknya, gelombang elektromagnetik yang sudah kalian pelajari di kelas X adalah gelombang yang dapat menjalar tanpa medium. Contoh: gelombang radio, cahaya tampak, sinar-X dan sinar gamma. Cahaya sebagai gelombang tentu mempunyai sifat, yaitu dapat mengalami pembiasan, pemantulan, interferensi, difraksi, dan polarisasi.

A. Interferensi pada Celah Ganda (Percobaan Young)

Salah satu metode yang telah dilakukan oleh Thomas Young (1773-1829) adalah mendemonstrasikan pola interferensi cahaya untuk mempelajari salah satu karakteristik cahaya yang berkaitan dengan penentuan panjang gelombangnya. Metode yang digunakan adalah dengan menggunakan celah ganda, lihat gambar 4.1! Seperti yang sudah dipelajari pada bab I dan II, bahwa ada dua pola yang dihasilkan dalam proses interferensi, yaitu pola destruktif dan konstruktif. Interferensi konstruktif total terjadi jika kedua puncak/perut gelombang saling bertemu dan saling menguatkan. Ini bisa terjadi jika kedua gelombang mempunyai fase yang sama (*sefase*). Interferensi total destruktif terjadi jika lembah dan puncak bertemu dan keduanya mempunyai fase berlawanan.

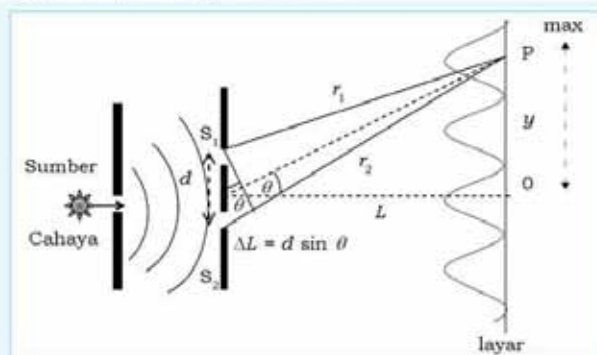
Pola interferensi cahaya sulit diamati karena panjang gelombangnya terlalu kecil (sekitar 10^{-7} m). Juga untuk mendapatkan pola interferensi yang stabil dibutuhkan dua sumber cahaya yang koheren, yaitu sumber cahaya yang dapat menghasilkan gelombang yang mempunyai fase konstan satu sama lainnya dan memiliki fase yang sama. Artinya, pada pertemuan dua gelombang, puncak gelombang bertemu dengan puncak gelombang dan lembah gelombang bertemu dengan lembah gelombang, sehingga selalu terjadi tumpang tindih (*overlapping*). Jika kedua sumber cahaya tidak koheren, maka tidak akan terjadi pola interferensi.

Untuk itu, Young melakukan percobaan dengan menggunakan satu sumber cahaya (cahaya matahari) yang dilewatkan melalui dua celah sempit. Dua celah dari satu sumber dimaksudkan agar mendapatkan cahaya yang koheren. Artinya, apabila terjadi perubahan sumber cahaya, tidak akan terjadi masalah karena selalu melawati dua celah sehingga diharapkan tetap koheren dan perbedaan fasenya tetap konstan.



Gambar 4.1 Geometri percobaan Young: celah ganda

Analisis dari percobaan Young (lihat gambar 4.1) yaitu seberkas sinar monokromatis (cahaya dengan satu jenis panjang gelombang) didatangkan pada dua celah sejajar berdekatan yang berjarak d . Dengan demikian, dua celah S_1 dan S_2 ini bertindak sebagai 2 sumber gelombang koheren. Pada jarak L dari celah, dipasang layar. Dikarenakan difraksi cahaya atau pembelokan cahaya pada sekitar celah, maka gelombang cahaya tersebar keluar dan terjadi pola interferensi pada layar. Pada layar akan tampak pola interferensi terang (puncak) dan gelap (lembah) secara bergantian, lihat gambar 4.2.



Gambar 4.2 Geometri percobaan Young pada celah ganda

Pengukuran panjang gelombang cahaya memerlukan sifat geometri dari percobaan Young seperti gambar 4.2. Tampak bahwa lintasan untuk celah S_2 ke P lebih panjang daripada lintasan cahaya dari celah S_1 ke P. Dari gambar 4.2 tampak bahwa beda lintasan (ΔL) tersebut adalah,

$$\Delta L = d \sin \theta \quad (4.1)$$

Hubungan beda fase antara dua gelombang terhadap beda lintasan telah dibicarakan dalam bab II (interferensi gelombang bunyi). Interferensi gelombang bunyi yang bersifat sinusoidal juga berlaku untuk gelombang cahaya. Interferensi konstruktif terjadi di sembarang titik bilamana perbedaan lintasan dua gelombang mempunyai fase yang sama, dan berlaku,

$$\Delta L = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (4.2)$$

Hal yang serupa untuk interferensi yang bersifat destruktif, beda lintasannya,

$$\Delta L = \frac{m\lambda}{2} \quad (m = 1, 3, 5, \dots) \quad (4.3)$$

Jadi, untuk titik P dari gambar 4.2, lokasi terang (interferensi konstruktif) terjadi jika

$$d \sin \theta = n\lambda \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots) \quad (4.4)$$

Untuk $n = 0$ menunjukkan frinji (garis terang atau gelap) ke nol yang berkaitan dengan pusat maksimum. Perbedaan lintasan sangat bervariasi dari satu titik ke titik yang lain, sehingga menghasilkan perbedaan fase dan interferensi.

Panjang gelombang dapat ditentukan dengan pengukuran $d \sin \theta$ untuk keadaan tertentu, misalkan pada frinji yang terang (lain dari yang di pusat). Sudut θ dikaitkan dengan pergeseran jarak y . Jika P adalah sebuah titik pusat frinji yang terang, maka jarak dari pusat terang ke sentral maksimum terhadap frinji ke- n , adalah

$$y = L \tan \theta = L \left(\frac{\sin \theta}{\cos \theta} \right) \quad (4.5)$$

Jika θ kecil ($y \ll L$), $\cos \theta = 1$ dan $\tan \theta = \sin \theta$ sehingga persamaan 4.5 dapat ditulis dalam bentuk,

$$y = L \sin \theta \rightarrow \sin \theta = \frac{y}{L} \quad (4.6)$$

Substitusi persamaan 4.6 ke persamaan 4.4 maka didapatkan persamaan baru,

$$d \frac{y}{L} = n\lambda \rightarrow y_n = \frac{nL\lambda}{d} \quad (\text{berlaku untuk } \theta \text{ kecil}) \quad (4.7)$$

di mana y_n adalah untuk jarak frinji terang ke- n dari sentral maksimum pada sisi yang lain.

Jadi, dari persamaan 4.7 didapatkan persamaan panjang gelombang monokromatik,

$$\lambda = \frac{y_n d}{nL} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.8)$$

Hal yang sama untuk frinji gelap,

$$y_m = \frac{mL\lambda}{2d} \rightarrow \lambda = \frac{2dy_m}{mL} \quad (m = 1, 3, 5, \dots) \quad (4.9)$$

Untuk meningkatkan **kemampuan sosial dan akademik** kalian, kerjakanlah tugas berikut!

Tugas 4.1

1. Coba kalian buktikan persamaan 4.9 untuk untuk frinji-frinji gelap ke- m !
2. Apa yang terjadi jika d , yaitu jarak antara kedua celah diperbesar?
3. Apa yang terjadi jika jarak L juga diperbesar?
4. Apa pengaruh panjang gelombang dari sumber terhadap pola interferensi?
5. Secara teori, bagaimana komentar kalian untuk mendapatkan pola interferensi yang baik?
6. Diskusikan hasil tugasmu dengan teman-teman sekolahmu!

Untuk meningkatkan **kemampuan personal dan akademik** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 4.1

Untuk menentukan panjang gelombang sinar yang dipancarkan lampu Na, sinar itu dilewatkan pada dua celah yang berjarak 0,4 mm. Pada jarak 1,5 m dari celah dipasang layar. Jika hasil interferensi pada layar diperoleh jarak garis kuning pusat sampai dengan kelima adalah 5 mm, berapakah panjang gelombang sinar natrium itu?

Penyelesaian:

Data yang diperoleh dari contoh soal 4.1 adalah:

Diketahui:

$$d = 0,4 \text{ mm} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ m}$$

$$L = 1,5 \text{ m}$$

$$y = 5 \text{ mm} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Ditanya:

Panjang gelombang sinar Na?

Jawab:

Untuk menentukan panjang gelombang untuk frinji yang ke-5 digunakan pers.(4.8), yaitu:

$$\lambda = \frac{5 \times 10^{-3} \text{ m} \times 4 \times 10^{-4} \text{ m}}{(5)(1,5 \text{ m})} = \frac{20 \times 10^{-7} \text{ m}^2}{7,5 \text{ m}} = 2,7 \times 10^{-7} \text{ m}$$

B. Interferensi pada Lapisan Tipis

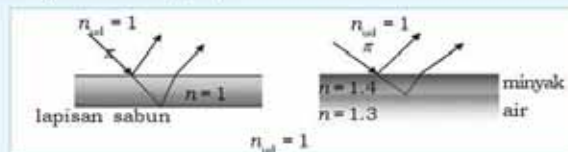
Apakah kalian pernah melihat warna pelangi yang terjadi pada permukaan gelembung sabun, minyak tanah, solar dan bensin di atas permukaan air? Fenomena ini terjadi karena adanya interferensi cahaya pantul, lihat gambar 4.3. Namun kalian perlu mengetahui bagaimana fase gelombang cahaya yang dipengaruhi oleh pemantulan. Ingat pada gelombang tali untuk ujung tetap pulsa pantul mengalami perubahan fase 180° dan sebaliknya untuk ujung bebas tidak mengalami perubahan fase. Interferensi gelombang cahaya yang terjadi pada lapisan sabun maupun minyak (oil) tergantung pada kerapatan optis atau indeks bias dari kedua material.



Sumber: Hyperphysics

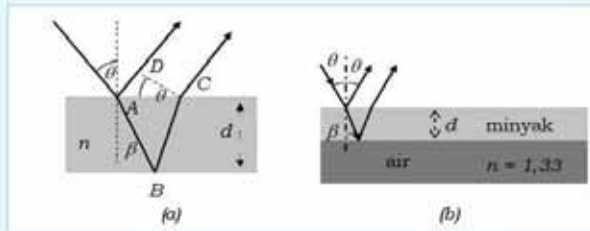
Gambar 4.3 Interferensi Cahaya Pantul.

Gelombang cahaya yang merambat dalam satu medium akan dipantulkan dengan perubahan fase sebesar 180° (π) di daerah perbatasan dengan medium kedua yang mempunyai indeks bias lebih besar daripada medium pertama ($n_{\text{udara}} < n_{\text{sabun}}$, $n_{\text{udara}} < n_{\text{minyak}}$). Sebaliknya tidak akan terjadi perubahan fase pantul untuk gelombang cahaya yang merambat dari medium dengan indeks bias lebih besar ke medium dengan indeks bias lebih kecil. Contoh: rambatan gelombang dari lapisan sabun ke udara atau dari minyak ke air, lihat gambar 4.4(a-b).



Gambar 4.4 Pola interferensi cahaya pantul, (a) lapisan sabun, (b) minyak di atas permukaan air

Mengapa bisa muncul warna pelangi pada lapisan minyak di permukaan air atau aspal jalan yang basah? Lihat gambar 4.5, dimana panjang lintasan gelombang dalam lapisan tergantung pada sudut datang. (Mengapa?)



Gambar 4.5 Geometris pada lapisan tipis

Untuk menjawab pertanyaan tersebut kalian perhatikan pada gambar 4.5(a) dan 4.5(b). Pada gambar 4.5(a) menunjukkan suatu lintasan cahaya monokromatik pada lapisan tipis dengan panjang gelombang λ . Analisis matematik secara geometri dapat dijelaskan sebagai berikut:

Perbedaan panjang lintasan ΔL ,

$$\Delta L = n(AB + BC) - AD$$

$$AB = \frac{d}{\cos \beta}$$

$$AD = (2d \tan \beta)(\sin \theta)$$

$$AD = 2d \tan \beta (n \sin \beta)$$

Sehingga beda panjang lintasan,

$$\begin{aligned} \Delta L &= 2nd \left(\frac{1}{\cos \beta} - (\tan \beta)(\sin \beta) \right) \\ \Delta L &= 2nd \left(\frac{1 - \sin^2 \beta}{\cos \beta} \right) = 2nd \cos \beta \end{aligned} \quad (4.10)$$

Interferensi destruktif,

$$2nd \cos \beta = m\lambda \quad (4.11a)$$

dengan perubahan fase π menjadi interferensi konstruktif dengan persamaan,

$$2nd \cos \beta = (m - 1/2)\lambda \quad (4.11b)$$

Sebaliknya untuk interferensi konstruktif berlaku,

$$2nd \cos \beta = m\lambda \quad (4.12a)$$

Dengan perubahan fase nol menjadi interferensi destruktif dan berlaku

$$2nd \cos \beta = (m - 1/2)\lambda \quad (4.12b)$$

Kreasi Fisika

Hantu gunung Broken, yang dalam Bahasa Jerman disebut Brockenspekter, adalah gejala yang terjadi ketika bayang pendaki gunung jatuh di awan. Ini terjadi karena Matahari berada di posisi rendah di belakang tubuh si pendaki. Jika kondisinya tepat, akan muncul lingkaran-lingkaran berwarna di sekeliling bayang-bayang. Indonesia memiliki banyak gunung, cari tahu ketinggian gunung-gunung tersebut kemudian bandingkanlah antarsatu dengan lainnya. Cobalah mendaki salah satu gunung tersebut dengan temanmu. Apakah peristiwa "Hantu Gunung Broken" dapat terjadi di gunung lain? Peristiwa fisika apakah yang sebenarnya terjadi pada kondisi itu?



Sumber: jendela iptek 2

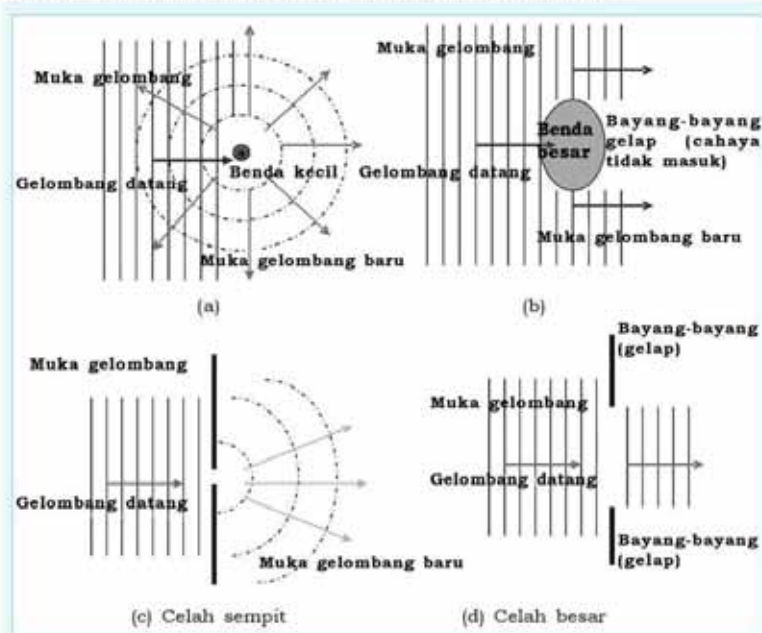
Pada gambar 4.5(b), warna yang terlihat pada lapisan minyak tergantung pada sudut pandang. Sudut θ adalah sudut datang yang besarnya sama dengan sudut pantul. λ_r adalah panjang gelombang untuk pemantulan maksimum, dan d adalah ketebalan lapisan. Untuk pemantulan maksimum didapatkan hubungan persamaan,

$$2nd \cos \theta = (m - 1/2)\lambda_r \quad (4.13)$$

C. Difraksi

Dalam optik geometri, cahaya dipresentasikan dengan sebuah lintasan sinar dan digambarkan sebagai garis lurus. Jika model ini dipresentasikan pada sifat cahaya, maka sulit untuk memahami munculnya efek interferensi seperti yang dilakukan oleh Young untuk celah ganda. Jadi, yang terjadi hanyalah dua cahaya terang yang tampak lewat dua celah dan sisanya dalam bentuk bayang-bayang gelap (*shadow*) dikarenakan cahaya terhalang dan tidak dapat masuk. Namun, pada kenyataannya terjadi pola interferensi yang berarti bahwa cahaya terdeviasi dari lintasan garis lurus dan masuk ke daerah yang sebenarnya daerah bayang-bayang gelap. Huygens mengusulkan bahwa ketika gelombang cahaya masuk ke daerah

celah, maka gelombang tersebar ke luar dari celah dan gelombang cahaya mendevasi atau terbelokkan. Peristiwa ini disebut difraksi. Difraksi terjadi jika gelombang melalui celah sempit, di sekitar ujung benda kecil atau benda yang lancip, lihat gambar 4.6!



Gambar 4.6 Syarat terjadinya pola difraksi pada gelombang cahaya.

Gambar 4.6(a) menunjukkan adanya muka gelombang baru setelah gelombang cahaya menumbuk benda berukuran kecil, sebaliknya pada gambar 4.6(b) tidak terjadi pola difraksi atau munculnya muka gelombang baru. Apabila gelombang cahaya mengenai benda berukuran besar, gelombang cahaya tersebut akan dipantulkan kembali sehingga di belakang benda tampak gelap (bayang-bayang gelap) dan di atas atau di bawah benda, gelombang



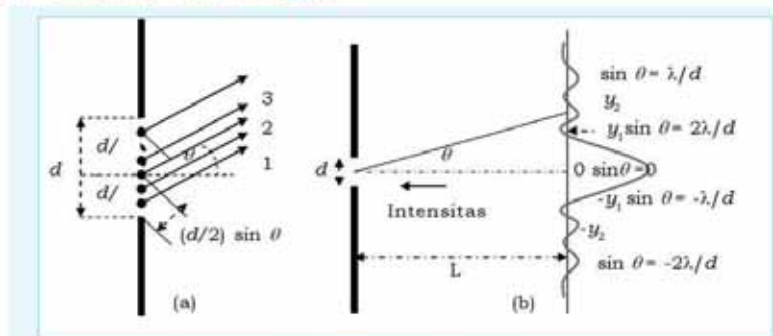
(Sumber: Hyperphysics)

Gambar 4.7 Difraksi dari sinar laser He-Ne yang dikenakan sebuah ujung benda sebagai penghalang. Gambar diambil 4m dari ujung benda.

bang terus merambat sehingga tampak terang. Hal yang sama pada celah sempit dan lebar. Untuk celah sempit terjadi muka gelombang baru dan menyebar ke segala arah, gambar 4.6(c). Untuk celah lebar tidak muncul muka gelombang baru sehingga tidak terjadi pola difraksi, gambar 4.6(d).

Gambar 4.7 menunjukkan hasil difraksi benda penghalang yang tak tembus cahaya dengan laser He-Ne, dimana nampak frinji-frinji terang dan gelap secara berurutan.

1. Difraksi Celah Tunggal



Gambar 4.8 Pola difraksi

Gambar 4.8 menunjukkan pola difraksi yang ditunjukkan oleh celah tunggal. Untuk memudahkan analisis, jarak celah sebesar d kita bagi menjadi dua, yaitu $\frac{1}{2}d$. Semua gelombang yang berasal dari celah adalah sefase. Perhatikan gelombang 1 dan 3, gambar 4.8 yang berasal dari bawah dan pusat celah. Gelombang 1 merambat lebih jauh daripada gelombang 3 dengan beda lintasan sebesar $(d/2) \sin \theta$. Jika perbedaan lintasannya sebesar $(1/2)\lambda$ (berkaitan dengan beda fase 180°), maka kedua gelombang tersebut saling meniadakan dan pola interferensinya bersifat destruktif. Secara matematis dapat ditulis,

$$\frac{d}{2} \sin \theta = \frac{\lambda}{2} \Rightarrow \sin \theta = \frac{\lambda}{d} \quad (4.14)$$

Jika celah tersebut dibagi 4 bagian, maka kita dapat menemukan gelap pada layar untuk,

$$\sin \theta = \frac{2\lambda}{d} \quad (4.15)$$

Jika celah dibagi 6 bagian, maka dengan cara yang sama kita dapatkan bagian gelap pada layar,

$$\sin \theta = \frac{3\lambda}{d} \quad (4.16)$$

Secara umum untuk pola difraksi dengan kondisi interferensi destruktif atau interferensi minimal (frinji gelap)

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{d} \text{ dimana } m = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots \quad (4.17)$$

dimana sudut θ adalah sudut yang didesain untuk memberikan nilai minimum dengan $m = 1, 2, 3, \dots$ pada sisi lain dari frinji terang. (Mengapa m tidak boleh sama dengan nol?). Posisi titik ketika terjadi interferensi konstruktif adalah $\frac{1}{2}$ antara garis gelap. Perhatikan pada gambar 4.8(b) bahwa untuk pusat garis terang adalah dua kali lebar dari maksimum garis gelap. Gambar 4.8 (b) menunjukkan bahwa $\tan \theta = (y_i/L)$ untuk θ kecil maka $\sin \theta \sim \tan \theta = (y_i/L)$. Berdasarkan persamaan 4.17, maka dapat ditulis kembali,

$$\sin \theta = m \frac{\lambda}{d} \Rightarrow \frac{y_i}{L} = \pm 1 \frac{\lambda}{d} \Rightarrow y_i = \pm \frac{\lambda L}{d} \quad (4.18)$$

Secara umum persamaan 4.18 dapat ditulis,

$$y_m = \pm \frac{mL\lambda}{d} \quad (m = 1, 2, 3\dots) \quad (4.19)$$

di mana y_i adalah garis gelap orde ke-1 diukur dari pusat sumbu. Persamaan 4.19 mempunyai bentuk yang sama dengan persamaan 4.7, yaitu persamaan untuk frinji terang pada pola interferensi dari celah ganda.

Prediksi yang dapat diutarakan berkaitan dengan persamaan 4.19 adalah:

1. untuk lebar celah d , semakin besar panjang gelombang (λ), semakin lebar pola difraksinya
2. untuk panjang gelombang λ , semakin sempit nilai d , semakin lebar pola difraksinya

KISI

"Mata" pada burung merak ini diwarnai oleh batangan-batangan prenuk zat yang bernama melanin. Batangan-batangan ini tertata sedemikian rupa sehingga menimbulkan interferensi jika cahaya jatuh padanya.



Sumber : jendela iptek 2

3. lebar untuk sentral maksimum adalah dua kali lebar sisi maksimum.

Persamaan 4.19 tidak dapat diaplikasikan untuk lebar celah yang terlalu sempit (dikarenakan menggunakan suatu pendekatan sudut kecil). Jika d mengecil sampai sama dengan orde dari panjang gelombang cahaya, maka sentral maksimumnya menyebar ke seluruh layar. Efek difraksi yang mudah diamati jika $\lambda \gg d$.

Sebaliknya, jika celah dibuat lebih lebar, maka pola difraksinya menjadi lebih sempit. Frinji-frinjinya menyempit sehingga sulit untuk membedakan kapan panjang gelombang lebih kecil daripada lebar celah ($\lambda \ll d$). Pola difraksi yang dihasilkan menjadi kabur. Pola difraksi semacam ini bisa kalian amati dari bayangan/citra yang dihasilkan oleh cahaya matahari yang masuk melalui lubang korden jendela pada ruangan yang gelap.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut ini!

Contoh Soal 4.2

1. Berkas cahaya dengan panjang gelombang 580 nm menumbuk celah dengan lebar 0,20 mm. Sebuah layar ditempatkan 1,5 m dari celah tersebut. Tentukan posisi garis gelap pertama dan lebar dari pusat garis terang.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$\lambda = 580 \text{ nm}$$

$$d = 0,20 \text{ mm}$$

$$L = 1,5 \text{ m}$$

Ditanya:

- a. posisi garis gelap?
b. lebar pusat garis terang?

Jawab:

Berdasarkan persamaan 4.17, untuk $m = \pm 1$, maka persamaan yang dipakai adalah

$$\sin \theta = \pm \frac{\lambda}{d} = \pm \frac{5,8 \times 10^{-7} \text{ m}}{0,2 \times 10^{-3} \text{ m}} = \pm 29,0 \times 10^{-4}$$

dan berdasarkan persamaan 4.17,

$$y_1 = L \sin \theta = 1,5 \text{ m} \times 29 \times 10^{-4} = \pm 43,5 \times 10^{-4} \text{ m}.$$

Jadi lebar garis terang terhadap pusat adalah $2|y_1| = 8,7 \times 10^{-3} \text{ m}$

2. Seberkas sinar dengan panjang gelombang 6000 Å datang tegak lurus pada sebuah kisi yang mempunyai 1.000 goresan tiap cm. Jika pada jarak 1,5 m dipasang layar, berapa jarak terang pusat sampai terang orde ke-4?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$\lambda = 6.000 \text{ Å} = 6 \times 10^{-7} \text{ m}$$

$$d = \frac{1 \text{ cm}}{1.000} = 1,0 \times 10^{-5} \text{ m}$$

$$L = 1,5 \text{ m}$$

$$m = 4$$

Ditanya:

y_4 (untuk terang pusat ke orde ke -4)?

Jawab:

Berdasarkan persamaan 3.19:

$$y_m = \pm \frac{mL\lambda}{d}$$

$$y_m = \frac{4(1,5 \text{ m})(6 \times 10^{-7} \text{ m})}{1,0 \times 10^{-5} \text{ m}} = 36 \text{ cm}$$

Tugas 4.2

Sinar laser dengan panjang gelombang $\lambda = 1700 \text{ nm}$ mengenai sebuah celah tunggal yang lebarnya $d = 0,25 \text{ mm}$. Sebuah lensa cembung digunakan untuk memfokuskan sinar pada layar. Jarak antara pita gelap kedua di sebelah kiri dan pita gelap kedua di sebelah kanan terang pusat adalah 8,0 mm.

- Gambarkan diagram percobaan tersebut lengkap dengan sketsa intensitas sinar pada layar. Dari gambar tersebut, tentukan:
- Jarak fokus lensa!
- Lebar pita terang pusat!

Bila kalian mengendarai mobil di daerah perkotaan yang penuh dengan gedung-gedung bertingkat atau di daerah pegunungan sambil mendengarkan radio dari salah satu pemancar, maka kalian akan mendengarkan kualitas suara yang kejelasannya sangat bervariasi dari tempat satu ke tempat yang lain, kadang terdengar kadang tidak. Analisislah dari konsep difraksi!

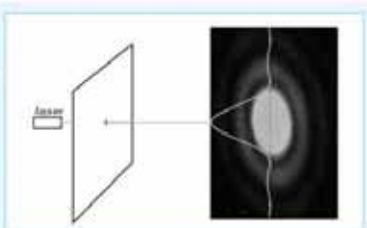
2. Pola Difraksi dengan Celah Bentuk Lingkaran

Banyak sistem optik menggunakan lubang dalam bentuk lingkaran daripada bentuk celah. Pola difraksi yang didapatkan dari lubang bentuk lingkaran dapat dilihat pada gambar 4.9. Gambar 4.9 terdiri dari pusat lingkaran yang terang dikelilingi oleh cincin-cincin gelap dan terang yang semakin meredup. Pola difraksi semacam ini disebut sebagai *Airy disk*.

Contoh difraksi ini sangat penting, karena mata kita sebagai salah satu instrumen optik yang mempunyai lubang kecil lingkaran (kelas X, alat-alat optik). Analisis menunjukkan bahwa keterbatasan sudut resolusinya,

$$\theta_m = 1,22 \frac{\lambda}{d} \quad (4.20)$$

di mana d adalah diameter lubang.

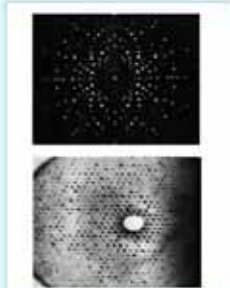


(Sumber: Hyperphysics)

Gambar 4.9 Pola difraksi dengan sebuah lubang kecil berbentuk lingkaran

3. Difraksi Sinar X

Difraksi dapat digunakan untuk mengukur panjang gelombang sinar-X. Beberapa percobaan telah membuktikan bahwa panjang gelombang sinar-X sekitar orde 10^{-8} cm, namun adalah hal yang tidak mungkin untuk membuat sebuah *grating* difraksi (kumpulan celah kecil) sebesar panjang gelombang tersebut. Sekitar tahun 1913 Max Von Laue seorang fisikawan dari Jerman mengusulkan untuk



(Sumber: College Physics, Jerry D. Willson)

Gambar 4.10 Difraksi sinar-X

pengukuran panjang gelombang sinar-X menggunakan benda kristal yang berfungsi sebagai *grating* difraksi. Karena jarak antar atom untuk kristal mempunyai orde 10^{-8} cm. Percobaan Laue menunjukkan jika sinar-X diarahkan ke kristal, maka pola difraksinya bisa diamati dengan jelas, lihat gambar 4.10.

Gambar 4.10(a), mengilustrasikan difraksi oleh bidang atom dalam kristal seperti NaCl. Kalian bisa lihat bahwa perbedaan lintasan ditunjukkan oleh $2d \sin \theta$, di mana d adalah jarak antara bidang-bidang internal kristal. Jadi untuk kondisi interferensi konstruktif, persamaannya adalah

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (4.21)$$

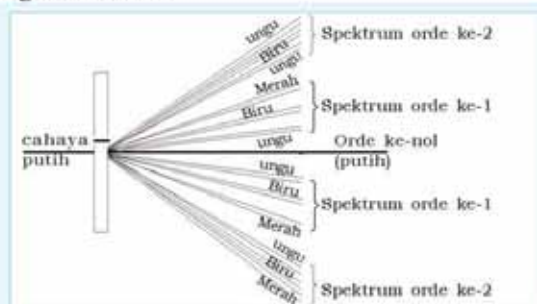
Persamaan 4.21 disebut hukum Bragg untuk menghormati seorang fisikawan Inggris yang pertama menurunkan persamaan tersebut.

Panjang gelombang sinar-X secara eksperimen ditentukan dengan cara ini. Difraksi sinar-X dapat digunakan untuk menentukan struktur atom, tidak hanya dalam bentuk kristal sederhana, namun digunakan juga untuk kristal yang lebih kompleks dalam bidang biologi seperti molekul protein dan DNA.

4. Difraksi pada Celah Majemuk (Kisi)

Di depan telah mengenai percobaan celah ganda oleh Young. Ternyata pola difraksi oleh celah ganda tidak memberikan hasil yang tajam. Untuk mendapatkan hasil yang teliti dibuatlah banyak celah, sehingga pola difraksi menjadi jauh lebih tajam, seperti tampak pada gambar 4.17. Peralatan ini disebut kisi

Kisi terdiri dari ribuan celah berupa garis (goresan) tiap sentimeter. Semakin banyak celah pada kisi, semakin tajam pola difraksi yang dihasilkan.



Gambar 4.11 Difraksi pada kisi

Misalkan sebuah kisi terdiri dari N garis/cm, maka besarnya tetapan kisi dinyatakan sebagai

$$d = \frac{1}{N} \quad (4.22)$$

Pola interferensi maksimum terjadi bila,

$$d \sin \theta = m \cdot \lambda, \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad (4.23)$$

sedangkan pola interferensi minimum terjadi bila,

$$d \sin \theta = (m - \frac{1}{2})\lambda; \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4.24)$$

di mana d = tetapan kisi yang satuannya cm^{-1}

D. Polarisasi

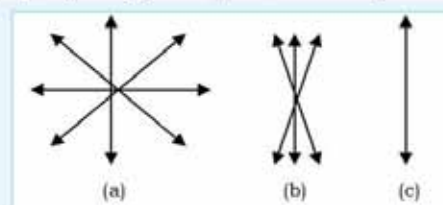
Ketika kalian berfikir tentang polarisasi cahaya, kalian dapat memvisualisasikan polarisasi dengan menggunakan kaca atau kaca mata Polaroid yang merupakan aplikasi dari prinsip ini. Mengingat kembali cahaya sebagai gelombang elektromagnet terdiri dari osilasi vektor medan listrik (\vec{E}), dan medan magnet (\vec{B}) yang saling tegak lurus satu sama lainnya. Cahaya yang berasal dari sumber terdiri dari sejumlah gelombang elektromagnet yang dipancarkan oleh atom-atom sumber. Setiap atom menghasilkan gelombang dengan sifat khusus yang berkaitan dengan arah getaran atom sumber, sehingga cahaya yang dihasilkan dari sejumlah atom sumber mempunyai orientasi vektor medan listrik dan magnet yang bervariasi arah getarnya.

Gelombang cahaya yang mempunyai orientasi secara random disebut sebagai cahaya tak terpolarisasi, lihat gambar 4.12(a) untuk vektor medan listrik. Gambar 4.12(b) menunjukkan hanya ada sebagian orientasi dari vektor medan listrik, cahaya dikatakan terpolarisasi sebagian. Jika hanya ada satu bidang orientasi, disebut polarisasi bidang atau polarisasi linear, gambar 4.12(c). Adanya fenomena ini menunjukkan bahwa cahaya sebagai gelombang elektromagnet bersifat transversal. Gelombang longitudinal, seperti gelombang bunyi tidak dapat mengalami peristiwa polarisasi karena tidak mempunyai getaran dua dimensi.

Cahaya dapat dipolarisasi dengan beberapa cara, yaitu pemantulan, pembiasan ganda, dan polarisasi hamburan (*scattering*).

1. Polarisasi karena Pemantulan

Jika sebuah cahaya yang tak terpolarisasi (cahaya biasa) menumbuk medium yang transparan, seperti gelas, maka cahaya tersebut sebagian diteruskan (ditransmisikan) dan sebagian lagi dipantulkan. Cahaya yang dipantulkan mungkin terpolarisasi secara penuh, mungkin sebagian, atau mungkin tidak sama sekali, tergantung pada sudut datangnya. Keadaan tidak terpolarisasi terjadi apabila sudut datangnya 0° atau tegak lurus terhadap garis normal. Sudut datang sangat bervariasi, ini bisa ditemukan ketika terjadi polarisasi sebagian. Komponen medan listrik yang paralel terhadap permukaan dipantulkan lebih kuat, menghasilkan polarisasi sebagian. Namun pada sudut tertentu akan menghasilkan polarisasi secara penuh atau sempurna. Pada sudut ini, hanya sebagian cahaya yang mengalami pembiasan terpolarisasi sebagian.



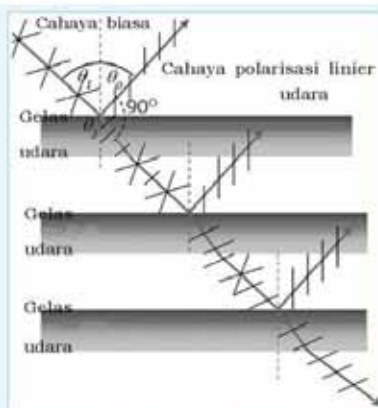
Gambar 4.12. (a) Tak polarisasi, (b) Polarisasi sebagian, (c) polarisasi bidang

David Brewster (1781-1868) ahli fisika dari Scotlandia menemukan polarisasi penuh jika antara pemantulan dan pembiasan cahaya membentuk sudut 90° , lihat gambar 4.13 dan sudut datang disebut sudut polarisasi (θ_p) atau sudut Brewster.

Berdasarkan gambar 4.13, sudut yang dibentuk sinar pantul dan bias adalah 90° , karena

$$\theta_1 + 90^\circ + \theta_2 = 180^\circ \quad (4.25)$$

Kemudian $\theta_1 + \theta_2 = 90^\circ$ atau $\theta_2 = 90^\circ - \theta_1$



Gambar 4.13. Polarisasi karena pemantulan

Hukum Snellius untuk sinar datang dalam udara, $\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = n$.
 Karena $\sin \theta_2 = \sin (90^\circ - \theta_1) = \cos \theta_1$, jadi

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{\sin \theta_1}{\cos \theta_1} = \tan \theta_1 = n \Rightarrow \tan \theta_p = n \Rightarrow \theta_p = \tan^{-1} n \quad (4.26)$$

Karena gelas mempunyai sifat dispersi, maka sudut Brewster juga tergantung pada panjang gelombang cahaya datang.

Gambar 4.13 menunjukkan tumpukan lempengan kaca, pemantulan dari setiap permukaan secara berturut-turut menaikkan intensitas berkas cahaya polarisasi pantul. Berkas cahaya bias menjadi lebih terpolarisasi linier dikarenakan pembiasan yang beruntun. Efek seperti ini yang mengacu pada polarisasi karena pembiasan. Dalam aplikasinya, lapisan film tipis dari material yang bersifat transparan digunakan untuk menggantikan tumpukan gelas. Warna pelangi yang tampak di langit atau cahaya pelangi, merupakan cahaya terpolarisasi sebagian. Ini terjadi karena sudut pantul dalam molekul air mendekati sudut Brewster.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut ini!

Contoh Soal 4.3

Cahaya matahari dipantulkan dari permukaan air kolam. Berapa sudut cahaya datang dari matahari jika polarisasi pantulnya terbesar? Indeks bias air 1,33.

Penyelesaian:

Diketahui:

$$n_{\text{air}} = 1,33$$

Ditanya:

Tentukan sudut ketinggian (*altitude*) polarisasi terbesar!

Jawab:

Altitude adalah sudut antara matahari dan horison, sehingga

sudut datangnya adalah, $\theta = 90^\circ - \theta_p$ dimana

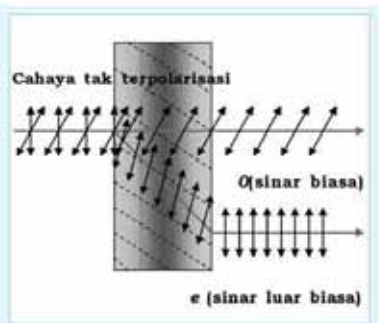
$$\theta_p = \tan^{-1} n$$

$$\theta_p = \tan^{-1} 1,33 = 53^\circ \text{ Sehingga } \theta = 90^\circ - 53^\circ = 37^\circ$$

2. Polarisasi karena Bias Kembar

Jika cahaya monokromatik menjalar ke sebuah gelas, kecepatannya sama untuk semua arah dan dikarakteristikkan dengan indeks bias tunggal. Material seperti ini disebut isotropik yang berarti material tersebut mempunyai karakteristik yang sama untuk semua arah. Beberapa jenis kristal seperti kuarsa, kalsit dan es mempunyai sifat anisotropik terhadap kecepatan cahaya, artinya dalam material tersebut kecepatan cahaya akan berbeda dalam arah yang berbeda. Sifat anisotropik akan memberikan sifat optik yang unik, yang mana suatu material mempunyai indeks bias yang tidak homogen atau bervariasi, sehingga memberikan arah rambatan yang berbeda pula. Material seperti ini disebut material yang mempunyai sifat bias ganda (*doubly refracting*).

Contoh: jika berkas cahaya tak terpolarisasi menumbuk kristal kalsit (CaCO_3), kuarsa (SiO_2), mika, gula, topaz, dan es seperti pada gambar 4.14 dan membentuk sudut tertentu terhadap sumbu kristal, maka dapat membiaskan secara ganda dan memisahkan menjadi dua komponen atau dua sinar. Satu sinar disebut sinar ordiner (*ordinary*) atau sinar biasa, yang ketika masuk ke dalam kristal tidak dibelokkan dan mempunyai indeks bias n_o .



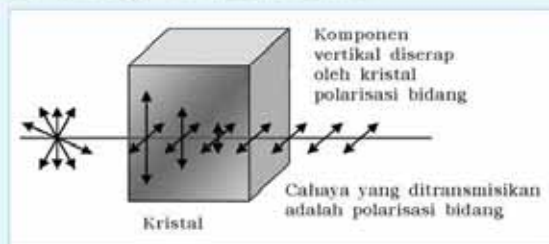
Gambar 4.14. Bias kembar pada kristal

Sedangkan sinar yang satunya disebut sinar ekstraordiner (*extraordinary*) atau sinar luar biasa dengan indeks bias n_e , dimana sinar jenis ini ketika masuk ke kristal akan dibiaskan atau dibelokkan. Garis putus-putus pada gambar 4.14 disebut sumbu optik. Sepanjang sumbu ini berlaku $n_o = n_e$ dan tidak lagi menampilkan sinar luar biasa namun hanya ditransmisikan.

3. Polarisasi karena Absorpsi Selektif

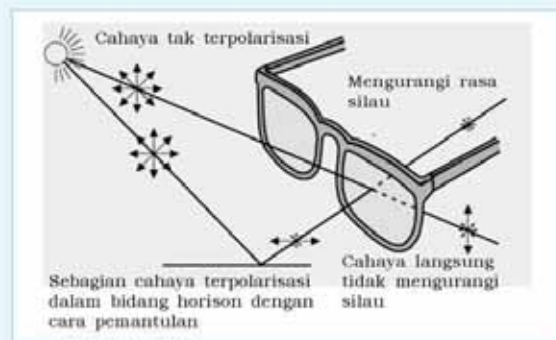
Seberkas sinar tak terpolarisasi (sinar wajar) yang masuk pada kristal tourmalin (*tourmaline*) akan mengalami peristiwa bias kembar, dimana salah satu sinar polarisasi akan diserap. Sifat kristal ini disebut dikroisme (*dichroisme*). Jika kristal ini cukup tipis, akan lebih kuat menyerap salah satu sinar polarisasi atau bahkan

memungkinkan terjadi penyerapan yang sempurna. Keadaan ini terjadi jika pertemuan cahaya pada bidang polarisasi, lihat gambar 4.15, berkas sinar biasa akan diteruskan. Dengan demikian, kristal tourmalin hanya meneruskan sinar polarisasi yang mempunyai arah getar sama dengan sinar luar biasa.



Gambar 4.15. Sifat kristal tourmalin

Jenis kristal dikrois yaitu herapathite, setelah W. Herapath, seorang Inggris yang menemukan sifat-sifat polarisasi pada tahun 1852. Jenis kristal ini sangat penting dari segi penerapannya, sekarang dikenal dalam dunia perdagangan disebut Polaroid yang prinsip kerjanya menggunakan konsep polarisasi cahaya yang dikenakan pada sebuah kristal. Kacamata yang menggunakan jenis kristal ini saat dipakai tidak menimbulkan silau. Berikut ditunjukkan cara kerja kacamata Polaroid, lihat gambar 4.16.



Gambar 4.16 Kaca mata polaroid

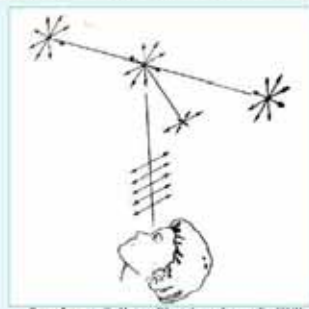
4. Polarisasi Akibat Hamburan

Ketika cahaya datang masuk pada larutan tertentu, kemungkinan yang terjadi adalah cahaya sebagian besar diserap oleh partikel-partikel terus dipancarkan kembali olehnya. Proses ini disebut hamburan. Hamburan cahaya matahari dalam atmosfer bumi menghasilkan efek yang menarik. Peristiwa polarisasi cahaya langit (yaitu cahaya matahari yang dihamburkan oleh atmosfer), warna langit yang biru dan warna kemerahan saat matahari terbit dan terbenam.

Hamburan atmosfer menyebabkan cahaya langit terpolarisasi. Ketika cahaya tak terpolarisasi datang pada molekul-molekul udara, medan listrik dari gelombang cahaya menyebabkan sekelompok elektron-elektron dari molekul tersebut bergetar. Getarannya bersifat kompleks, tetapi adanya percepatan muatan menyebabkan adanya pancaran radiasi, seperti getaran muatan pada antena stasiun radio (materi gelombang elektromagnet di kelas X). Intensitas dari radiasi yang dipancarkan paling besar sepanjang garis tegak lurus terhadap osilasi.

Gambar 4.17 mengilustrasikan seorang pengamat memandang dari sudut 90° terhadap arah cahaya matahari akan menerima cahaya polarisasi linier dikarenakan osilasi muatan secara horisontal. Cahaya juga mempunyai polarisasi untuk komponen vertikal. Pada arah sudut pandang yang lain, kedua komponen akan tampak, dan cahaya langit tampak melalui sebuah filter polarisasi, sehingga menghasilkan polarisasi sebagian.

Hamburan cahaya matahari oleh molekul-molekul udara menyebabkan langit tampak biru. Ini bukan disebabkan oleh pengaruh polarisasi cahaya, tetapi disebabkan oleh absorpsi selektif cahaya. Sebagai osilator, molekul-molekul udara mempunyai frekuensi resonan di daerah ultraviolet. Konsekuensinya, cahaya matahari lebih mudah terhamburkan di daerah warna biru (bagian dari cahaya tampak) daripada warna merah. Karena ukuran partikel udara lebih kecil daripada panjang gelombang cahaya, besarnya hamburan ditemukan berbanding terbalik dengan panjang gelombang pangkat empat ($\frac{1}{\lambda^4}$). Hubungan ini disebut hamburan Rayleigh.



Sumber: College Physics, Jerry D. Willson

Gambar 4.17 Polarisasi akibat hamburan

Pada saat Matahari mendekati garis horison, cahaya matahari merambat pada jarak yang lebih jauh melalui kerapatan udara yang lebih besar di dekat permukaan bumi. Karena itu, cahaya mengalami hamburan dan hanya warna merah yang mencapai pengamat dipermukaan bumi. Hal yang sama terjadi pada saat Matahari terbenam.

Rangkuman

1. Pada interferensi celah ganda;
 - a. Terjadi interferensi konstruktif jika $d \sin \theta = n \lambda$ ($n = 0, 1, 2, 3, \dots$). Jarak pusat terang ke sentral maksimum terhadap Frinji ke- n adalah $y = L \tan \theta$

$$y = \frac{n L \lambda}{d} \text{ (untuk } \theta \text{ kecil)}$$
 - b. terjadi interferensi destruktif jika $d \sin \theta = \frac{m \lambda}{2}$ ($m = 1, 3, 5, \dots$)
 Jarak pusat gelap ke sentral maksimum terhadap frinji ke- m adalah $y_m = \frac{m L \lambda}{2d}$
2. Interferensi pada lapisan tipis terjadi apabila cahaya datang dari medium yang indek biasanya lebih kecil menuju yang lebih besar.
 - a. Terjadi interferensi konstruktif apabila $2nd \cos \beta = m \lambda$
 - b. Terjadi interferensi destruktif apabila $2nd \cos \beta = (m - \frac{1}{2}) \lambda$
3. a. Difraksi pada celah tunggal, pola interferensi berikut destruktif apabila $\sin \theta = m \frac{\lambda}{d}$ dimana ($m = \pm 1, \pm 2, \pm 3, \dots$)
- b. Difraksi pada celah tunggal, pola interferensi bersifat konstruktif posisi titik adalah $\frac{1}{2}$ antara garis gelap
4. Difraksi sinar-X, pola interferensi konstruktif terjadi apabila $2d \sin \theta = n \lambda$ ($n = 1, 3, 5, \dots$)

5. Pada kisi difraksi, pola interferensi maksimum terjadi jika $d \sin \theta = m \lambda$ ($m = 0, 1, 2, \dots$)
sedangkan pola interferensi minimum terjadi jika $d \sin \theta = (m - \frac{1}{2}) \lambda$ ($m = 1, 2, 3, \dots$)
6. Polarisasi dapat disebabkan karena 4 hal, yaitu
 - a. polarisasi karena pantulan
 - b. polarisasi karena bias kembar
 - c. polarisasi karena absorpsi selektif
 - d. polarisasi akibat hamburan

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

1. Suatu cahaya melewati celah ganda yang memiliki jarak antar celah 0,10 cm sedemikian sehingga terbentuk pola gelap terang pada layar yang berjarak 60 cm. Jarak antarpola terang adalah 0,048 cm, maka panjang gelombang cahaya yang digunakan tersebut adalah....
 - a. 200 nm
 - b. 300 nm
 - c. 400 nm
 - d. 600 nm
 - e. 800 nm
2. Pada percobaan Young (celah ganda), jika jarak antara dua celahnya dijadikan dua kali semula, maka jarak antara dua garis gelap yang berturutan menjadi

a. 4 kali semula	d. $\frac{1}{2}$ kali semula
b. 2 kali semula	e. tetap tidak berubah
c. $\frac{1}{4}$ kali semula	
3. Seberkas sinar monokromatis dengan panjang gelombang 5×10^{-7} m datang tegak lurus pada kisi. Jika spektrum orde kedua membuat sudut 30° dengan garis normal pada kisi, maka jumlah garis per cm pada kisi adalah....

- a. 2×10^3 d. 2×10^4
 b. 4×10^3 e. 5×10^4
 c. 5×10^3
4. Dua berkas sinar monokromatik X deviasi maksimum orde kedua sinar X sama dengan sudut deviasi maksimum orde ketiga sinar Y. Nilai perbandingan panjang gelombang X dan Y adalah
- a. $\frac{2}{3}$ d. $\frac{1}{2}$
 b. $\frac{3}{2}$ e. $\arcsin \frac{3}{2}$
 c. 2
5. Jarak lampu sebuah mobil 122 cm. Panjang gelombang rata-rata cahaya yang dipancarkan kedua lampu mobil itu 500 nm. Jika nyala kedua lampu itu diamati oleh seseorang yang diameter pupil matanya 2 nm, maka jarak maksimum mobil dengan orang tersebut supaya nyala kedua lampu masih tampak terpisah adalah
- a. 250 m d. 4000 m
 b. 400 m e. 5000 m
 c. 2500 m
6. Untuk mengukur panjang gelombang sinar merah dilakukan percobaan sebagai berikut: sinar kuning ($\lambda = 5800 \text{ \AA}$) dijatuhkan tegak lurus pada suatu kisi. Pola difraksi diterima layar yang jaraknya 4 m dari kisi. Garis terang orde pertama berjarak 58 cm dari garis terang pusat. Sesudah itu sinar merah dijatuhkan tegak lurus pada kisi. Ternyata garis terang orde pertama berjarak 65 cm dari garis terang pusat. Panjang gelombang sinar merah tersebut adalah ...
- a. 6200 Å d. 6500 Å
 b. 6300 Å e. 6600 Å
 c. 6400 Å
7. Cahaya suatu sumber melalui dua celah sempit yang terpisah 0,1 mm. Jika jarak antara dua celah sempit terhadap layar 100 cm dan jarak antara garis gelap pertama dengan garis terang pertama adalah 2,95 mm, maka panjang gelombang cahaya yang digunakan adalah (dalam mm)....

2. Cahaya dengan panjang gelombang 750 nm lewat melalui sebuah celah yang lebarnya $1,0 \times 10^{-3}$ mm.
Tentukan:
 - a. sudut deviasi pita gelap ke satu (δ_1)!
 - b. lebar pita terang pusat pada layar sejauh 20 cm!
3. Dua bintang yang terpisah sejauh $3,7 \times 10^{11}$ m memiliki jarak yang sama diukur dari suatu tempat di bumi. Sebuah teleskop memiliki lensa objektif dengan diameter 1,02 m dan dapat mendeteksi bintang-bintang ini sebagai dua benda terpisah. Anggap bahwa cahaya yang diamati memiliki panjang gelombang 50 nm, dan daya urai teleskop lebih dipengaruhi oleh efek difraksi daripada oleh turbulensi atmosferik. Tentukan jarak maksimum bintang-bintang ini dari bumi!
4. Pita terang orde ke-2 terjadi ketika cahaya dengan panjang gelombang 400 nm jatuh pada dua buah celah dengan sudut 30° terhadap arah berkas semula. Tentukan jarak pisah kedua celah!
5. Untuk menentukan panjang gelombang suatu sinar monokromatik digunakan percobaan Young yang datanya sebagai berikut: jarak antara dua celah adalah 0,2 mm, jarak celah ke layar adalah 50 cm dan jarak antara garis gelap ketiga pada layar 1 mm. Hitung panjang gelombang sinar tersebut!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab V

Listrik Statis

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat memformulasikan gaya listrik, kuat medan listrik, fluks, potensial listrik, energi potensial listrik serta penerapannya pada keping sejajar.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Muatan listrik

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

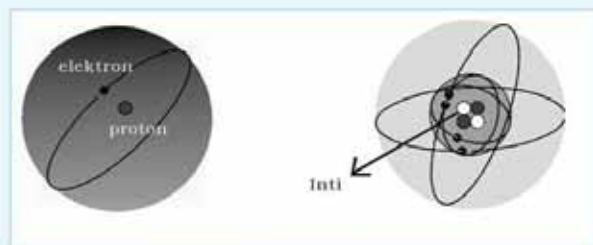
1. Gaya listrik
2. Medan listrik
3. Potensial listrik
4. Fluks listrik
5. Energi potensial listrik
6. Kapasitor

Dalam kehidupan sehari-hari kita akan merasa susah bila listrik padam. Di Koran atau di TV banyak berita tentang demo dari masyarakat yang di daerahnya di pasang "SUTET" karena SUTET menyebabkan mereka menjadi pusing atau rasa sakit yang lain. Kalian juga pernah mendengar ada gardu listrik bertegangan tinggi dan gardu listrik bertegangan rendah. Di antara kalian juga ada

yang tahu bahwa di negara kita tegangan listrik yang disediakan untuk rumah tangga adalah 220 V, tapi di negara-negara lain seperti Amerika menggunakan tegangan 110 V. Dengan demikian peralatan listrik yang diekspor harus dibuat sesuai dengan tegangan yang dipakai oleh suatu negara. Bila kita berbicara tentang listrik, maka kita akan berbicara tentang tegangan, arus listrik, energi listrik. Coba kalian cari daftar kata-kata yang terkait dengan listrik! Kalian juga sering melihat kilat yang selalu disertai petir yang bergemuruh. Pada bab berikut kita akan mendiskusikan tentang listrik dan konsep-konsep yang terkait dengan listrik.

Kita belajar kelistrikan selalu mulai dari menyelidiki gaya listrik antara dua benda bermuatan yang keadaannya diam. Dalam ilmu fisika, konsep yang terkait dengan benda-benda yang bermuatan listrik yang dalam keadaan diam disebut elektrostatik.

Muatan listrik adalah sifat materi/benda yang sangat mendasar. Pada dasarnya, muatan listrik dikaitkan dengan partikel-partikel yang seukuran dengan atom, seperti elektron dan proton. Model atom secara sederhana digambarkan seperti model sistem tata surya, ditunjukkan pada gambar 5.1.



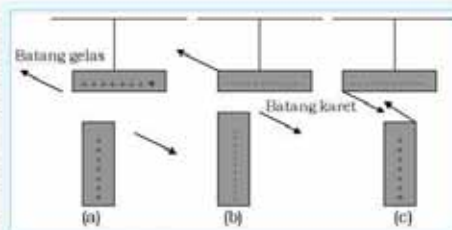
Gambar 5.1 Atom hidrogen

Gambar 5.1 memperlihatkan model atom yang dianalogikan dengan model sistem tata surya yang disederhanakan, struktur atom digambarkan seperti planet yang mengorbit matahari. Elektron-elektron dianalogikan sebagai planet dan inti (nukleus) atom dianalogikan sebagai matahari, maka elektron-elektron mengorbit inti yang mana inti terdiri dari proton dan neutron. Dalam sistem atom, ada gaya yang selalu mempertahankan elektron tetap mengorbit inti atom. Gaya yang mempertahankan elektron mengorbit inti atom adalah gaya tarik-menarik antara proton pada inti dan elektron pada bidang orbitnya. Muatan listrik terdiri dari dua macam yang dapat dibedakan sebagai muatan positif dan

muatan negatif. Sebuah proton mempunyai muatan positif dan elektron mempunyai muatan negatif namun keduanya mempunyai besar muatan yang sama. Dua buah benda yang bermuatan akan mengalami gaya kelistrikan, baik tarik-menarik ataupun tolak-menolak. Arah gaya listrik antara dua buah benda yang bermuatan yang berinteraksi tunduk pada prinsip fisika yang disebut hukum muatan atau hukum gaya-muatan, dinyatakan sebagai berikut:

"bila ada dua buah muatan yang berinteraksi, muatan senama tolak-menolak, sedangkan muatan yang berbeda saling tarik-menarik."

Disini berarti bahwa dua buah muatan positif atau dua buah muatan negatif masing-masing mengalami gaya tolak-menolak, sedangkan dua buah muatan yang berbeda mengalami gaya tarik menarik, lihat gambar 5.2.



Gambar 5.2 Skema arah antara dua buah benda yang bermuatan listrik

Gaya tolak atau gaya tarik ini besarnya sama, arahnya berlawanan dan bekerja pada benda yang berbeda, seperti gaya aksi-reaksi pada hukum III Newton.

Muatan elektron digunakan sebagai satuan muatan dasar, karena elektron adalah muatan yang terkecil yang dapat diamati di alam. Muatan listrik yang terkandung dalam suatu benda adalah kelipatan bilangan bulat dari muatan elektron, baik untuk muatan positif maupun muatan negatif. Muatan biasanya diberi simbol dengan huruf q , maka muatan yang terkandung dalam suatu benda dapat dituliskan sebagai,

$$q = ne \quad (5.1)$$

di mana n adalah bilangan bulat. Kadang-kadang kita mengatakan bahwa muatan terkuantisasi (dapat dihitung sebagai bilangan bulat) yang artinya bahwa muatan yang terkandung dalam suatu benda harus merupakan kelipatan bilangan bulat dari muatan dasar. Sedangkan massa adalah besaran yang tak terkuantisasi karena boleh mempunyai harga berapapun.

Dalam sistem SI, satuan muatan adalah coulomb (C), yang diambil dari nama penemu gaya yang bekerja pada benda yang bermuatan, Charles A. De Coulomb, (1736-1806).

Ada beberapa istilah yang sering digunakan dalam pembicaraan sifat-sifat listrik. Sebuah benda dikatakan mempunyai muatan netto berarti bahwa benda tersebut mempunyai kelebihan muatan, baik positif ataupun negatif. Kelebihan muatan dapat terjadi karena adanya perpindahan elektron dari satu benda ke benda lain. Misalnya sebuah benda mempunyai kelebihan muatan sebesar $+1,6 \cdot 10^{-19}$ C, berarti salah satu atom dari benda tersebut kehilangan satu elektron. Benda-benda tak bermuatan berarti pada benda-benda tersebut mempunyai muatan positif yang sama besar dengan muatan negatif dan benda tersebut dikatakan netral. Atom yang **kekurangan elektron** atau **kelebihan elektron** disebut **ion**. Besarnya muatan elektron adalah $1,6 \times 10^{-19}$ coulomb dan benda yang bermuatan 1 C jarang ditemui dalam kehidupan sehari-hari. Besar muatan pada benda yang sering dijumpai adalah dalam rentang μC (mikro coulomb, $1 \mu\text{C} = 10^{-6}$ C) sampai pC (picocoulomb, $1 \text{ pC} = 10^{-12}$ C).

Dalam memperbincangkan konsep-konsep gejala kelistrikan, ditunjukkan bahwa dalam sistem kelistrikan berlaku hukum kekekalan muatan, yaitu "**jumlah muatan netto suatu sistem yang terisolasi selalu tetap**".

Ini berarti bahwa muatan tidak dapat diciptakan dan tidak dapat dimusnahkan. Misal, dalam suatu sistem mula-mula terdiri dari dua buah benda yang netral, kemudian terjadi perpindahan elektron dari satu benda ke benda yang lain, benda yang menerima elektron mempunyai muatan negatif sedangkan benda yang kekurangan elektron mempunyai muatan positif. Besar muatan pada kedua benda tersebut sama tetapi tandanya berlawanan, maka jumlah total muatan sistem dua benda tersebut tetap nol.

Contoh Soal 5.1

Bila kalian menyeret kaki sepanjang karpet pada siang hari yang kering dan kamu memperoleh muatan netto sebesar $-32 \mu\text{C}$, apakah kalian kelebihan atau kekurangan elektron? Berapakah banyak kelebihan atau kekurangan elektron yang kalian miliki?

Penyelesaian:

Dari soal di atas diketahui kalian memperoleh muatan neto sebesar $-32 \mu\text{C} = -32 \times 10^{-6}\text{C}$, sehingga dikatakan kalian kelebihan elektron.

Berapa besar kelebihan atau kekurangan elektron yang kamu miliki?

Karena muatan neto yang kamu miliki bertanda negatif, berarti kamu memperoleh kelebihan elektron, jadi kamu bermuatan $q = 32 \times 10^{-6}\text{C}$

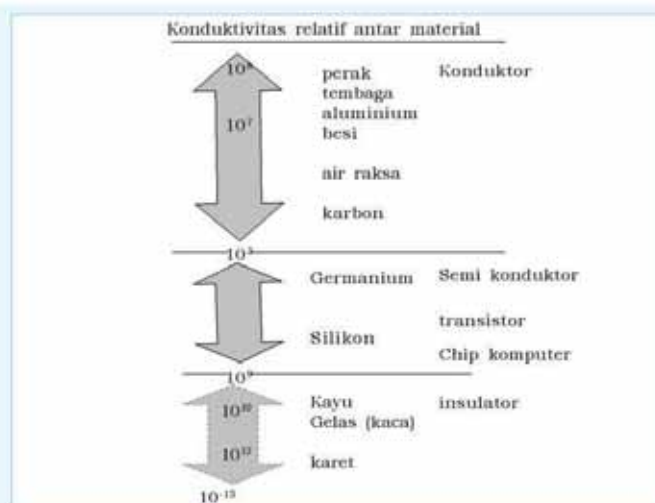
Dan banyaknya kelebihan elektron yang kamu miliki sebanyak

$$n = q/e = \frac{-32 \times 10^{-6}\text{C}}{-1,6 \times 10^{-19}\text{C}} = 2 \times 10^{14} \text{ buah elektron.}$$

A. Pemuatan Listrik Statis

Gaya tarik-menarik dan tolak-menolak secara mudah dapat didemonstrasikan. Sebelum mendemonstrasikan gaya tarik menarik dan tolak-menolak antara dua buah muatan, kita harus dapat membedakan lebih dulu mengenai konduktor dan isolator. Yang membedakan kedua jenis benda ini adalah pada kemampuannya untuk menghantarkan arus listrik atau muatan listrik. Beberapa material seperti logam adalah material yang mudah menghantarkan muatan listrik dan disebut konduktor. Sebaliknya seperti karet, gelas, dan sebagian besar plastik merupakan material yang sangat sulit menghantarkan muatan listrik dan disebut isolator. Perbandingan sifat konduktifitas antara beberapa material bisa dilihat pada gambar 5.3.

Gambaran umum tentang material konduktor adalah bahwa elektron valensi (elektron yang terletak pada kulit terluar) dari atom tersebut terikat sangat lemah sehingga elektron-elektron tersebut mudah lepas dari ikatan atomnya dan bergerak dalam konduktor. Elektron-elektron ini tidak permanen pada atom tertentu. Sebaliknya, untuk material isolator, elektron-elektron valensinya terikat sangat kuat dengan inti sehingga sulit untuk dimobilisasi.



Gambar 5.3 Perbandingan besarnya konduktivitas listrik antara konduktor, semi konduktor dan insulator

Pada gambar 5.3 ditunjukkan adanya jenis material antara konduktor dan isolator yang disebut semikonduktor. Kemampuan semikonduktor untuk menghantarkan muatan listrik lebih kecil bila dibandingkan dengan material logam, tetapi daya hantarnya lebih besar daripada isolator. Semikonduktor adalah pembentuk dasar transistor, sirkit zat padat, yang mana merupakan pangkal/dasar untuk tulang punggung dalam pengembangan teknologi/industri komputer modern.

Elektroskop adalah suatu alat yang digunakan untuk mendemonstrasikan karakteristik muatan listrik dalam suatu materi. Bentuk yang sederhana dari elektroskop terdiri dari sebuah batangan logam dengan sebuah bolam logam dipasang pada salah satu ujungnya. Pada ujung yang lain digantungkan satu pasang lempengan logam yang umumnya terbuat dari logam emas. Susunan peralatan ini dimasukkan dalam sebuah tabung gelas dan diisolasi dengan tutup karet terhadap gelas penyalubungnya. Jika benda bermuatan didekatkan ke bolam logam, maka elektron-elektron pada bolam tersebut akan tertarik atau tertolak. Misal, sebuah batang yang bermuatan negatif didekatkan ke bolam, elektron dalam bolam akan tertolak sehingga bolam menjadi bermuatan positif, seperti ditunjukkan pada gambar 5.4(b).

Elektron yang tertolak dari bolam logam ini dihantarkan ke lempengan emas, sehingga lempengan emas terbuka karena pada kedua lempengan tersebut mengandung muatan negatif dan bekerja gaya tolak menolak. Dengan cara yang sama tetapi batang yang didekatkan ke bolam bermuatan positif, maka elektron dalam bolam ditarik oleh muatan positif pada batang, sehingga bolam bermuatan negatif. Muatan positif batang yang tertolak dari bolam logam dihantarkan ke sepasang lempengan emas yang menyebabkan lempengan emas juga terbuka karena adanya gaya tolak-menolak antara muatan positif pada kedua lempengan tersebut.

Dari proses yang digambarkan di atas dapat disimpulkan bahwa muatan neto elektrostatik tetap nol tetapi penyebaran muatannya berubah, yaitu pada bolam logam dan sepasang lempengan logam emas. Elektrostatik dapat juga mempunyai muatan neto dengan cara pemuatan listrik statik yang akan didiskusikan pada bagian berikut.

1. Pemuatan Listrik dengan Gesekan

Secara umum pemuatan listrik statik adalah proses dimana sebuah insulator atau penghantar yang diisolasi memperoleh muatan neto. Dalam proses pemuatan seperti itu, bila bahan insulator tertentu digosok dengan bahan/kain atau wool, maka bahan insulator menjadi bermuatan listrik. Misal sebuah batang karet yang keras digosok dengan wool, batang tersebut memperoleh muatan neto negatif. Tetapi bila batang gelas digosok dengan sutra maka batang gelas memperoleh muatan neto positif. Pemuatan dengan cara ini disebut **Pemuatan dengan Gesekan**. Perpindahan muatan terjadi karena adanya kontak antara kedua benda dan juga tergantung pada sifat-sifat benda yang saling bergesekan, bukan hanya karena digosok atau ada gesekan.

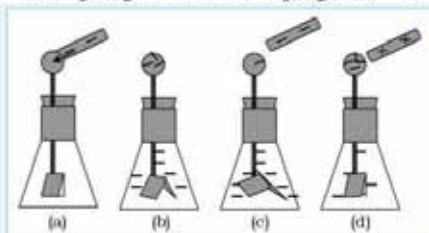
Penalaran: Jika ditinjau dari luar tidak bisa dikatakan apakah batang karet bertambah muatan negatifnya atau wool bertambah muatan positifnya. Karena gerakan elektron ke batang karet mempunyai arti fisis yang sama dengan gerakan muatan positif ke wool. Namun karena batang karet adalah insulator dan elektron-elektronnya terikat dengan kuat, maka yang paling mungkin terjadi adalah wool kehilangan elektron dan batang karet bertambah elektronnya.

Kalian mungkin akan mengalami pemuatan listrik statik melalui gesekan bila kalian berjalan di atas karpet wool pada hari yang sangat kering (panas), dan kalian akan tersengat oleh loncatan bunga api pada saat kalian menyentuh benda logam seperti gagang pintu. Hal ini terjadi karena kamu telah termuati listrik statik

dengan bergesekan dengan karpet, muatan listrik ini menghasilkan gaya listrik yang cukup besar untuk mengionisasi molekul-molekul udara antara tanganmu dengan gagang pintu. Aliran (perpindahan) muatan listrik ini menyebabkan terjadinya pelucutan muatan antara tangan dan gagang pintu sehingga menyebabkan timbulnya percikan bunga api. Tetapi bila suatu hari udara cukup lembab, lapisan tipis uap lembab pada sebuah benda akan menghalangi terjadinya penumpukan muatan (elektron) hasil pelucutan karena akan dihantarkan oleh lapisan tipis uap lembab tersebut.

2. Pemuatan Listrik dengan Cara Kontak

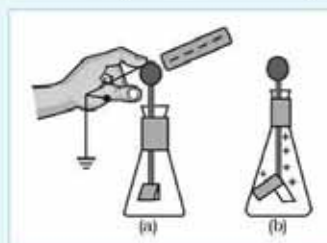
Mendekatkan sebuah batang bermuatan ke bolam elektroskop akan teramati bahwa batang termuati, tetapi kita tidak tahu bagaimana jenis muatannya, apakah positif atau negatif. Muatan yang terkandung dalam batang akan diketahui bila muatan pada elektroskop diketahui lebih dahulu. Sebagai contoh, elektron akan berpindah dari satu benda ke benda lain bila kedua benda tersebut disentuhkan, seperti dilukiskan pada gambar 5.4 (a). dimana sebuah bolam logam pada elektroskop yang disentuh oleh batang yang bermuatan negatif. Elektron-elektron dalam batang saling bertolakan satu sama lain sehingga ada elektron yang terlepas dan berpindah ke bolam logam elektroskop. Proses tersebut menunjukkan pemuatan listrik pada bolam logam dengan cara kontak atau disentuhkan, lihat gambar 5.4(b). Bila sebuah batang bermuatan negatif didekatkan dengan batang elektroskop bermuatan negatif, maka lempengan pada elektroskop mengembang dan semakin menjauh jika ada penambahan muatan negatif, lihat gambar 5.4c. Sebaliknya jika pada gambar 5.4(c) didekatkan batang bermuatan positif, maka lempengan tersebut bergerak ke arah menutup (menyusut) disebabkan elektron tertarik ke atas meninggalkan lempengan elektroskop, gambar 5.4(d).



Gambar 5.4 Pemuatan listrik dengan cara kontak (a) elektroskop netral yang disentuh dengan muatan negatif, (b) elektroskop mempunyai muatan negatif, (c) muatan negatif yang didekatkan akan menolak elektron, dan (d) muatan positif akan menarik muatan negatif

3. Pemuatan Listrik dengan Induksi

Pada diskusi sebelumnya dikatakan bahwa muatan yang berpindah atau bergerak adalah muatan negatif yaitu elektron, tetapi mengapa elektroskop menjadi bermuatan positif? Timbulnya muatan positif pada elektroskop karena bolam logam pada batang elektroskop disentuh dengan jari tangan. Menyentuh bolam logam pada ujung batang elektroskop dengan jari-jari tangan kita berarti kita membumikan elektroskop, maka kita menyediakan lintasan bagi elektron untuk mengalir (berpindah) ke bumi bila ada elektron yang bebas dalam elektroskop. Salah satu cara untuk membebaskan elektron dari elektroskop adalah dengan mendekatkan sebuah batang bermuatan negatif secara hati-hati (ujung batang jangan sampai menyentuh) ke bolam logam elektroskop sehingga elektron pada elektroskop ditolak oleh batang dan mengalir ke bumi lewat jari-jari tangan kita. Kemudian tangan kita dijauhkan dari bolam logam elektroskop sementara batang bermuatan negatif tetap berada di dekat bolam logam, maka elektroskop menjadi bermuatan positif karena elektron-elektron yang meninggalkan elektroskop tidak mungkin kembali ke elektroskop. Pemuatan elektroskop dengan cara ini disebut pemuatan listrik dengan cara induksi, lihat gambar 5.5.

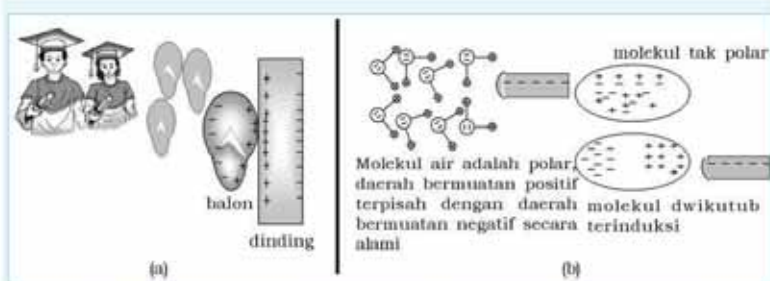


Gambar 5.5 Pemuatan listrik dengan induksi (a) elektron mengalir ke bumi lewat tangan (b) elektroskop bermuatan positif setelah tangan dijauhkan.

4. Polarisasi Muatan

Pemuatan dengan cara kontak dan induksi keduanya melibatkan pemindahan muatan dari suatu benda. Namun sebuah benda dapat mempunyai beberapa muatan yang bergerak di dalamnya sehingga tercipta daerah-daerah yang muatannya berbeda tetapi jumlah total muatan dalam benda tersebut tetap nol. Dalam hal ini induksi menyebabkan timbulnya polarisasi atau pemisahan muatan, lihat gambar 5.6(b). Kalian akan memahami mengapa balon menempel pada dinding atau langit-langit rumah setelah digosokkan pada rambut atau sweater seseorang pada hari yang udaranya kering. Balon tersebut termuati karena gesekan, dan balon yang termuati menginduksikan muatan yang berlawanan dengan muatan balon pada permukaan dinding sehingga menciptakan gaya listrik tarik-menarik, lihat gambar 5.6(a).

Pemuatan listrik statis mungkin dapat menjengkelkan bahkan membahayakan, tetapi pemuatan listrik statis mungkin juga memberi manfaat. Pakaian atau kertas sering melekat satu sama lain karena muatan listrik statis dan percikan lucutan muatan listrik statis dapat menimbulkan api, bahkan bisa terjadi letusan bila di sekitar percikan lucutan muatan tersebut terdapat gas yang mudah terbakar. Di lain pihak, udara yang kita hirup lebih bersih bila pada cerobong asap suatu pabrik menggunakan lapisan pengendap (*prasepitator*) elektrostatis. Pada alat-alat ini lucutan muatan listrik menyebabkan partikel yang dihasilkan oleh pembakaran menjadi bermuatan. Partikulat-partikulat yang bermuatan ini kemudian terbuang dari pipa asap dengan gaya listrik statis. Dewasa ini pembersih udara dengan muatan listrik statis juga tersedia untuk perumahan. Aplikasi lain prinsip muatan listrik statis adalah foto copy listrik statis.



Gambar 5.6 (a) sebuah balon yang termuat dengan gesekan yang menyentuh dinding menginduksi muatan positif pada dinding. Karena gaya tarik listrik statis maka balon melekat pada dinding (b) Molekul air yang terpolarisasi secara alami (polar-daerah yang bermuatan positif terpisah dengan daerah yang bermuatan negatif). Molekul tak polar dapat dipolarisasi dengan cara mendekati benda lain yang bermuatan padanya karena induksi gaya listrik statis menyebabkan muatan positif terpisah dari muatan negatif sehingga terbentuk molekul

B. Gaya Listrik

Bagaimanakah besar atau kekuatan gaya listrik? Hubungan antara gaya yang timbul antara dua buah partikel bermuatan listrik diselidiki oleh Charles de Coulomb (setelah satuan muatan listrik ditemukan), dengan menggunakan sebuah timbangan yang sangat sensitif untuk mengukur gaya. Dia menemukan bahwa besarnya gaya listrik antara dua muatan titik (q_1 dan q_2) tergantung pada

hasil kali kedua muatan tersebut dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara dua muatan tersebut; yaitu

$$F \propto \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (5.2)$$

Bentuk persamaan 5.2 secara matematik sama dengan gaya gravitasi antara dua titik massa, $F \propto \frac{m_1 m_2}{r^2}$. Seperti cara yang dilakukan Cavendish untuk mengukur besarnya konstanta gravitasi yang disebut konstanta gravitasi universal G , di mana $F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$, pengukuran yang dilakukan Coulomb menghasilkan harga konstanta pembandingan sehingga besarnya gaya listrik dapat dituliskan dalam bentuk persamaan hukum Coulomb sebagai

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (5.3)$$

Persamaan 5.3 hanya berlaku untuk sebuah titik muatan, dan berdasarkan eksperimen besarnya $k = 8,988 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2 \sim 9,00 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$.

Satuan besaran-besaran fisika pada persamaan 5.3 dalam sistem MKS, untuk gaya, F , dalam satuan newton, jarak, r , dalam satuan meter, dan muatan, q , dinyatakan dalam satuan coulomb. Namun jika dinyatakan dalam sistem satuan elektrostatis yaitu sistem CGS, kita menggunakan dyne sebagai satuan gaya, sentimeter sebagai satuan jarak dan statcoulomb untuk satuan muatan.

Satuan elektrostatis dari sebuah muatan didefinisikan sebagai muatan yang menolak muatan lain yang sejenis atau sebaliknya dengan gaya sebesar 1 dyne bila dua muatan berjarak 1 cm.

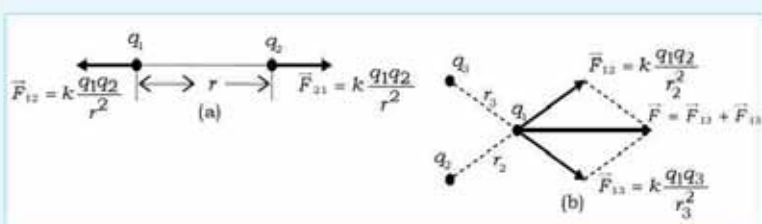
Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, kerjakan tugas berikut!

Tugas 5.1

Buktikan dengan menggunakan sistem CGS maka harga $k = 1$!

Gambar 5.7(a) menunjukkan dua buah gaya listrik yang besarnya sama namun arahnya berlawanan. Gaya-gaya ini kadang-kadang ditunjuk sebagai gaya elektrostatis, yang menekankan pada fakta

bahwa hukum Coulomb hanya berlaku untuk muatan yang tetap atau statis. Dalam beberapa contoh, kita meninjau gaya pada sebuah muatan tertentu yang disebabkan oleh dua atau lebih muatan lain. Resultan gaya pada sebuah muatan tersebut merupakan penjumlahan secara vektor dari semua gaya yang bekerja pada muatan tersebut yang disebabkan oleh beberapa muatan lain, lihat gambar 5.7(b).

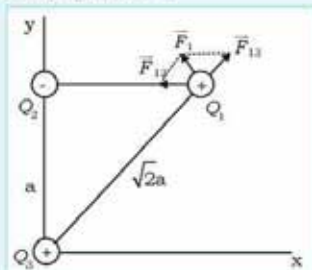


Gambar 5.7 Hukum Coulomb a) Gaya listrik elektrostatik pada dua titik muatan, besarnya gaya pada masing-masing muatan sama namun arahnya berlawanan b) Gaya pada sebuah titik muatan yang disebabkan oleh dua titik muatan yang lain

Contoh Soal 5.1

Tiga muatan titik diletakkan pada titik-titik sudut suatu segitiga siku-siku, seperti ditunjukkan pada gambar berikut, dengan $Q_1 = Q_3 = 7 \mu\text{C}$, $Q_2 = -3 \mu\text{C}$ dan $a = 0,2 \text{ m}$. Tentukan resultan gaya pada q_3 .

Penyelesaian:



Gambar gaya pada Q_1 karena Q_2 adalah \vec{F}_{12} . Gaya pada Q_1 karena Q_3 adalah \vec{F}_{13} . Gaya total \vec{F}_1 pada Q_1 adalah jumlah vektor \vec{F}_{12} dan \vec{F}_{13} .

Terlebih dahulu masing-masing gaya Coloumb pada Q_1 yang disebabkan hanya oleh Q_2 dan Q_3 dengan menggunakan persamaan:

$$\vec{F}_{13} = k \frac{Q_1 \cdot Q_3}{r_{13}} \quad r_{13} = \sqrt{2} a = \sqrt{2} (0,2 \text{ m}) = 0,2\sqrt{2} \text{ m}$$

$$= 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2} \frac{(7 \times 10^{-6} \text{ C})(7 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,2\sqrt{2} \text{ m})^2}$$

$$= 5,51 \text{ N}$$

$$\vec{F}_{12} = k \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r_{12}} \quad r_{12} = a = 0,2 \text{ m}$$

$$= 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2.\text{C}^{-2} \frac{(7 \times 10^{-6} \text{ C})(7 \times 10^{-6} \text{ C})}{(0,2 \text{ m})^2}$$

$$= 11,02 \text{ N}$$

Tentukan cosinus sudut apit antara \vec{F}_{13} dan \vec{F}_{12} . Perhatikan segitiga siku-siku OAB.

$$\cos \angle ABO = \frac{AB}{OB} = \frac{a}{\sqrt{2}a} = \frac{1}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2}\sqrt{2}$$

Sudut θ adalah pelurus $\angle ABO$, sehingga

$$\theta + \angle ABO = 180^\circ$$

$$\cos \theta = \cos (180^\circ - \angle ABO)$$

$$= -\cos \angle ABO$$

$$\cos \theta = -0,707$$

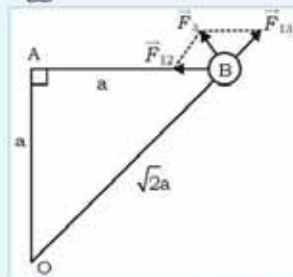
Hitunglah:

$$\vec{F}_1 = \sqrt{\vec{F}_{13}^2 + \vec{F}_{12}^2 + 2\vec{F}_{13} \cdot \vec{F}_{12} \cos \theta}$$

$$= \sqrt{(5,51 \text{ N})^2 + (11,02 \text{ N})^2 + 2(5,51 \text{ N})(11,02 \text{ N})(-0,707)}$$

$$= \sqrt{30,3601 + 121,4404 - 85,8584}$$

$$= 8,12 \text{ N}$$



Pemahaman Konseptual tentang Perpindahan Muatan

Sebuah sisir rambut yang digunakan untuk menyisir rambut, setelah sisir ditarik dari rambut, sisir tersebut dapat menarik potongan kecil kertas yang tak bermuatan, padahal sisir tersebut memperoleh muatan negatif pada saat ditarik dari rambut. Ini nampaknya melanggar hukum Coulomb, karena kertas tersebut muatannya nol, maka kita tidak mengharapkan adanya gaya listrik. Jelaskan bagaimana terjadinya gaya tarik-menarik?

Perlu kalian perhatikan bahwa ketika sisir didekatkan ke potongan kertas, maka muatan yang ada pada kertas akan terpolarisasi (pengutuban). Muatan positif akan berada pada ujung potongan kertas yang dekat dengan sisir dan sebaliknya muatan negatif akan menjauh ke ujung yang lain. Berdasarkan hukum Coulomb, gaya tarik-menarik antara muatan negatif dari sisir dengan muatan positif yang ada di ujung kertas lebih besar daripada gaya tolak menolaknya, sehingga resultan gaya yang dihasilkan oleh potongan kertas mengarah ke sisir.

Pertanyaan: Apakah fenomena ini memberi tahu kita tentang tipe muatan yang ada pada sisir?

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 5.3

Atom tembaga yang terdiri dari inti atom dikelilingi 29 elektron. Berat atom tembaga adalah 63,5 gram/mol. Dua potongan tembaga besarnya masing-masing 10 gram (diberi tanda a dan b) dan misalkan ada perpindahan elektron dari a ke b, yaitu satu elektron untuk setiap 1000 atom yang ada dalam potongan tembaga. Berapa gaya antara a dan b jika keduanya terpisah sejauh 10cm?

Penyelesaian:

Pertama kita harus menghitung berapa banyak muatan yang telah ditransfer dari a ke b. Jumlah atom dalam gram-mol (untuk tembaga 63,5 gram) adalah 6×10^{23} ; kita akan melihat berapa yang ditransfer;

$$6 \times 10^{23} \frac{\text{atom}}{\text{gram} \cdot \text{mol}} \times \frac{10 \text{ gram}}{63,5 \frac{\text{gram}}{\text{gram} \cdot \text{mol}}} \times \frac{1}{1000} = 9,45 \times 10^{19} \text{ elektron}$$

Karena muatan untuk setiap elektron adalah $-1e = -1,6 \times 10^{-19}$ coulomb, maka muatan yang dipindah besarnya $9,45 \times 10^{19}$ elektron $\times (-1,6 \times 10^{-19})$ (coulomb/elektron) = -15 coulomb.

Karena kedua potongan tembaga awalnya adalah netral, potongan tembaga a membawa muatan +15 coulomb pada saat potongan logam b membawa muatan -15 coulomb. Gaya tarik-menarik antara dua potongan tembaga,

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} = 9,00 \times 10^9 \frac{\text{N.m}^2}{\text{C}^2} \times \frac{(15\text{C})^2}{(0,1\text{m})^2} = 2,03 \times 10^{14} \text{N}$$

Berapa besar gaya ini? Sebagai ilustrasi kalian bisa renungkan bila sebuah kapal laut yang mempunyai massa kira-kira 70000 ton $= 7 \times 10^7$ kg maka kapal tersebut mempunyai berat sekitar 7×10^8 N. Oleh karena itu, maka kita kira-kira dapat mengangkat 300.000 kapal laut jika kita dapat menempelkan salah satu potongan tembaga tersebut. Pada faktanya dua potong tembaga yang netral tidak saling mendekat atau menjauh.

C. Medan Listrik

Medan listrik timbul di sekitar partikel yang bermuatan dan merupakan vektor medan yang dapat menunjukkan jenis gaya yang dialami oleh sebuah partikel bermuatan yang posisinya tertentu. Kuat atau besarnya medan listrik dinyatakan sebagai gaya yang dialami oleh satu satuan muatan positif.

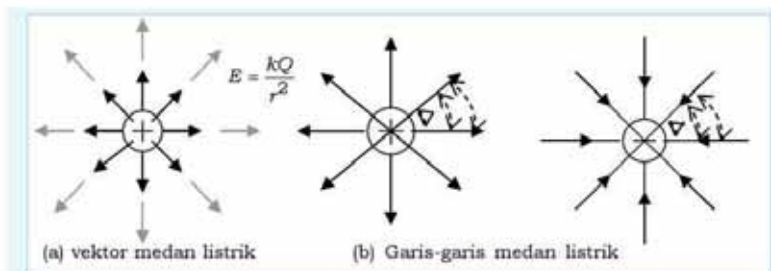
Untuk menyelidiki medan listrik di sekitar titik muatan, muatan uji harus cukup kecil sehingga medan yang ditimbulkannya dapat diabaikan. Jadi, medan listrik hanya dihasilkan oleh muatan atau sistem muatan lain disekitarnya. Marilah kita tinjau titik muatan tunggal q_0 dan kita anggap bermuatan positif. Untuk membedakan partikel satu dengan yang lain, maka partikel yang bermuatan positif tersebut disebut sebagai partikel/muatan uji (test) yang akan digunakan untuk mengukur kuat medan yang ditimbulkan oleh muatan lain. Besarnya medan listrik didefinisikan sebagai

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q_0} \quad (5.4)$$

dan satuan \vec{E} dalam sistem SI adalah N/C dan merupakan sebuah vektor medan dan arahnya sama dengan arah gaya listrik bila muatan uji (muatan positif) diletakkan pada titik tersebut. Besarnya medan listrik yang dialami oleh muatan uji yang disebabkan oleh sebuah muatan Q coulomb yang berjarak r darinya dapat dinyatakan sebagai

$$E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{q_0} \frac{kq_0Q}{r^2} = \frac{kQ}{r^2} \quad (5.5)$$

Besarnya medan listrik pada persamaan 5.5 adalah medan listrik yang ditimbulkan/dihasilkan oleh muatan Q , bukan muatan uji q_0 , maka persamaan 5.5 tidak mengandung q_0 . Beberapa vektor medan listrik di sekitar muatan positif diilustrasikan pada gambar 5.8. Dapat dilihat bahwa vektor medan mengarah ke luar dari (meninggalkan) muatan positif yang tidak lain adalah sama dengan arah gaya yang dialami oleh muatan uji dan besarnya vektor medan menurun dengan bertambahnya jarak dari muatan positif tersebut.

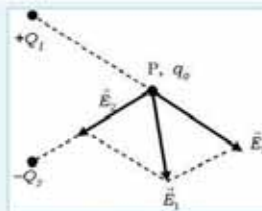


Gambar 5.8 Medan listrik (a) Arah medan listrik yang ditentukan dengan muatan uji. Besarnya medan listrik mengecil bila jaraknya dari muatan sumber membesar yang mencerminkan kuat medan berbanding terbalik dengan jaraknya terhadap muatan sumber, (b) Garis-garis medan listrik adalah garis hubung antara vektor medan listrik

Vektor medan listrik mengarah masuk ke (menuju) titik muatan bila titik muatan bermuatan negatif, maka arah medan listrik pada muatan negatif berlawanan dengan arah gaya listrik yang dialami oleh muatan tersebut. Bila partikel uji diletakkan di sekitar sistem

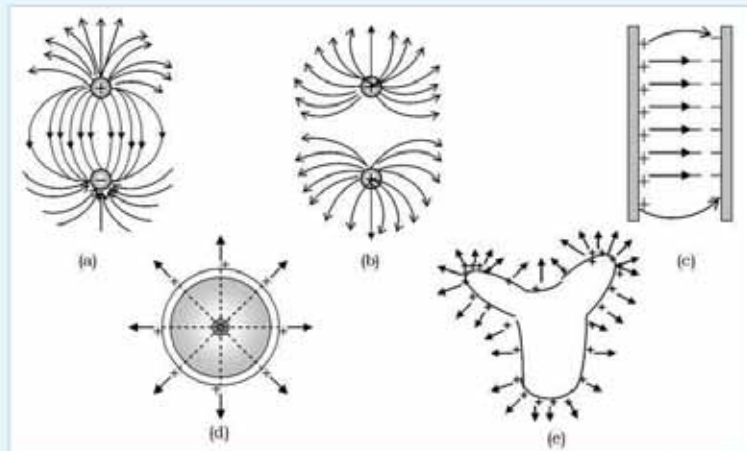
muatan, maka besarnya medan listrik pada muatan uji sama dengan penjumlahan vektor dari masing-masing vektor medan listrik dari individual muatan.

Resultan vektor medan listrik pada muatan uji merupakan penjumlahan vektor dari kedua vektor medan dari masing-masing muatan. Vektor medan listrik pada muatan uji yang disebabkan oleh $+Q_1$ terletak pada garis hubung muatan uji dengan $+Q_1$, berpangkal dari muatan uji menuju $+Q_1$, lihat gambar 5.9. Besarnya masing-masing vektor medan listrik tersebut adalah $|E_1|(\text{dikarenakan } Q_1) = k \frac{Q_1}{r^2}$ dan $|E_2|(\text{dikarenakan } Q_2) = k \frac{Q_2}{r^2}$, maka besarnya E yang dialami muatan uji adalah $|\vec{E}| = \sqrt{E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos \theta}$ di mana θ adalah sudut antara E_1 dan E_2 .



Gambar 5.9 Medan listrik pada muatan uji q_0 adalah penjumlahan dari masing-masing vektor medan yang disebabkan oleh $+Q_1$ dan Q_2 .

Ada cara yang lebih mudah untuk menyajikan medan listrik di dalam ruang, yaitu dengan grafik dimana pola medan listrik dilukiskan dengan menggunakan garis-garis gaya. Tinjaulah vektor medan listrik di sekitar muatan positif, lihat gambar 5.10(a). Kemudian hubungkan antara dua vektor medan listrik tersebut dengan garis yang berbentuk kurva, makin jauh dari muatan, panjang kurvanya makin besar. Hal ini menunjukkan bahwa besar medan listrik mengecil bila panjang kurvanya membesar, karena makin jauh letaknya dari muatan. Maka pada daerah dekat muatan, garis gayanya lebih rapat daripada daerah yang lebih jauh dari muatan. Arah medan listrik pada setiap titik pada garis gaya adalah tangen(garis singgung).



Gambar 5.10 Garis gaya dari (a) listrik dwikutub, (b) dua buah muatan positif, (c) pelat logam sejajar yang muatannya berlawanan, (d) bola logam yang bermuatan positif, dan (e) konduktor yang bentuknya tak teratur bermuatan positif.

Pada titik yang terletak pada garis gaya tersebut. Juga ditunjukkan bahwa garis-garis gaya listrik berawal dari muatan positif dan berakhir pada muatan negatif. Jumlah garis gaya yang meninggalkan atau menuju muatan sebanding dengan besarnya muatan tersebut. Aturan-aturan yang dituliskan di atas memberikan dasar untuk memetakan pola garis-garis gaya dari sistem muatan tertentu.

Gambar 5.10(a) menunjukkan arah garis gaya dari dua buah muatan yang berlawanan namun besarnya sama (sepasang muatan yang besarnya sama tetapi tandanya berlawanan disebut listrik dwikutub), (b) menunjukkan arah garis gaya yang ditimbulkan oleh dua muatan positif yang sama besar, (c) menunjukkan arah garis gaya pada plat logam paralel yang dimuati sama besar tetapi berlawanan, (d) arah garis gaya pada sebuah bola logam yang bermuatan positif, dan (e) arah garis gaya pada konduktor bermuatan positif tetapi bentuknya tidak teratur.

Diskusikan

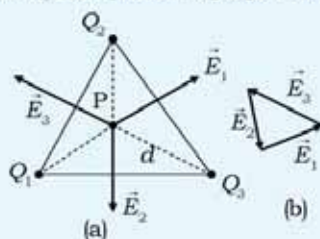
Dapatkah kalian menjelaskan mengapa arah garis gaya pada gambar 5.10(a) saling tarik-menarik dan saling tolak pada gambar 5.10(b)?

Pada benda yang bentuknya teratur seperti bola, bagaimana rapat garis gayanya? Bagaimana dengan rapat garis gaya pada konduktor yang bentuknya tidak teratur?

Mengapa bentuk penangkal petir selalu berujung runcing? Jelaskan!

Contoh Soal 5.4

Tiga buah muatan positif $+Q$ yang sama besarnya diletakkan pada sudut segitiga sama sisi dengan panjang sisinya a , seperti pada gambar 5.11. Berapa besarnya medan listrik yang dialami oleh sebuah titik pada pusat segitiga tersebut?



Gambar 5.11 (a) Tiga muatan yang sama memberikan kontribusi medan listrik, (b) Penjumlahan ketiga vektor medan listrik yang menghasilkan nol, c) perhitungan medan listrik dengan prinsip simetris didapatkan $E = 0$

Penyelesaian:

Ketiga muatan yang sama besar $Q_1 = Q_2 = Q_3 = Q$ terletak pada titik yang terpisah, sehingga besarnya medan listrik yang dihasilkannya dapat dihitung.

Setiap muatan dari ketiganya memberikan sebuah medan listrik yang arahnya menjauh dari masing-masing titik sudut dan juga meninggalkan titik P di mana,

$$|\vec{E}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{d^2} \text{ dimana } d \text{ adalah jarak dari titik sudut segitiga}$$

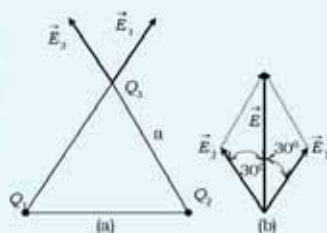
ke pusat segitiga yaitu titik P. Total medan listriknya adalah penjumlahan secara vektor yaitu $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3$ dan besarnya masing-masing medan E_1 , E_2 , dan E_3 mempunyai besar yang sama. Berdasarkan gambar 5.11 (b) dengan penjumlahan ketiga vektor tersebut akan menghasilkan harga nol.

Contoh Soal 5.5

Hitung gaya yang dihasilkan oleh ketiga muatan tersebut pada contoh soal di atas di sembarang titik sudut dari segitiga sama sisi!

Penyelesaian:

Karena semua muatan sama dan jarak antara masing-masing muatan sama, maka besarnya gaya yang dialami oleh setiap muatan pada titik sudut sama besar. Kita hanya perlu menghitung gaya yang dialami oleh salah satu muatan saja, misalnya kita hitung gaya listrik di titik Q_1 . Besarnya gaya listrik dapat dihitung dengan meng-



Gambar 5.12 Analisa geometri dari contoh 5.4

gunakan kuat medan listrik pada persamaan 5.4 dan 5.5 atau juga dapat dihitung secara langsung dengan persamaan 5.3.

Kedua medan \vec{E}_1 yang dikarenakan Q_1 dan \vec{E}_2 yang

dikarenakan Q_2 , besarnya adalah, $|E_1| = |E_2| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{a^2}$ tetapi

mempunyai arah yang berbeda. \vec{E}_1 mempunyai arah menjauh dari Q_1 dan \vec{E}_2 mempunyai arah menjauh dari Q_2 . Resultan medan listrik \vec{E} adalah jumlah dari kedua medan dengan

penjumlahan secara vektor, \vec{F}_1 , dengan arah ke atas dan besarnya dapat dihitung dengan menguraikan kedua vektor tersebut secara vertikal dan horisontal dimana sudut antara kedua vektor adalah 60° sehingga diperoleh,

$$|E| = 2|E_1| \cos 30^\circ = \frac{\sqrt{3}Q}{4\pi\epsilon_0 a^2}.$$

Karena $Q_3 = Q$ adalah positif, maka gaya pada Q_3 searah dengan arah vektor medan listrik, yaitu arah ke atas, besarnya gaya adalah,

$$|F| = Q|E| = \frac{\sqrt{3}Q^2}{4\pi\epsilon_0 a^2}.$$

Contoh 5.3 dan 5.4 menunjukkan cara menentukan atau menghitung besarnya medan listrik di sembarang titik yang dikarenakan oleh distribusi muatan titik, yaitu Q_1, Q_2, \dots, Q_n dimana masing-masing muatan tidak harus sama. Perhitungan medan listrik \vec{E}_1 dikarenakan tiap individual muatan titik dengan menggunakan persamaan 5.5; medan listrik total adalah penjumlahan semua vektor medan listrik secara parsial,

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \dots + \vec{E}_n \quad (5.6)$$

Jika ingin menghitung gaya yang bekerja pada sembarang muatan (contoh pada Q_3), maka muatan tersebut dapat dipandang sebagai muatan uji dan menghitung medan listrik \vec{E}' di titik yang bermuatan Q_3 . Kemudian gaya listrik di titik yang bermuatan Q_3 dihitung dengan persamaan 5.4 yaitu,

$$\vec{F} \text{ (bekerja pada } Q_3) = Q_3 \vec{E}' = Q_3 (\vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots + \vec{E}_n) \quad (5.7)$$

Perhatikan bahwa garis-garis medan listrik berawal dari muatan positif dan berakhir pada muatan negatif, bila tidak ada muatan negatif di sekitar, maka garis medan listrik akan menuju titik tak terhingga, antara tidak berpotongan dan jumlahnya garis medan listrik sebanding dengan besarnya muatan.

1. Medan Listrik dan Konduktor

Medan listrik dan konduktor bermuatan (konduktor yang terisolasi dari lingkungannya) mempunyai beberapa sifat yang menarik:

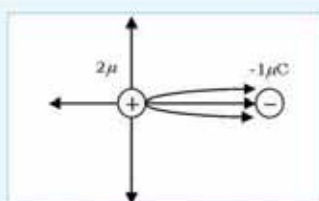
Medan listrik di setiap titik di dalam konduktor bermuatan adalah nol, lihat gambar 5.10(e) dan 5.14. Hal ini disebabkan karena muatan listrik yang tetap statis atau tetap diam tidak mengalami gaya listrik.

Muatan netto pada konduktor bermuatan yang terisolasi akan tersebar secara merata pada permukaan konduktor. Hal ini disebabkan karena muatan yang sejenis akan saling tolak-menolak sehingga masing-masing muatan akan memisahkan diri sejauh mungkin dari muatan yang lain.

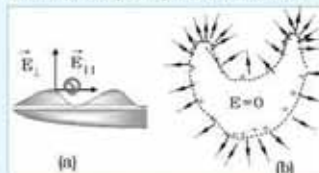
Medan listrik pada permukaan yang lebih luar dari konduktor bermuatan arahnya selalu tegak lurus permukaan. Maka pada permukaan bagian luar konduktor bermuatan tidak ada komponen medan listrik yang arahnya menyinggung permukaan, sebab bila ada medan listrik tangensial, maka menyebabkan gerakan muatan sepanjang permukaan, padahal faktanya muatan di permukaan diam, lihat gambar 5.14(a).

Muatan pada konduktor bermuatan cenderung mengumpul di tempat yang bentuknya runcing atau tempat yang kelengkungannya terbesar (jari-jarinya terkecil) dan tempat terkumpulnya muatan yang terbesar menimbulkan medan listrik yang terbesar juga (jumlah garis-garis gaya/medan terbanyak), lihat gambar 5.10(e) dan 5.14(b).

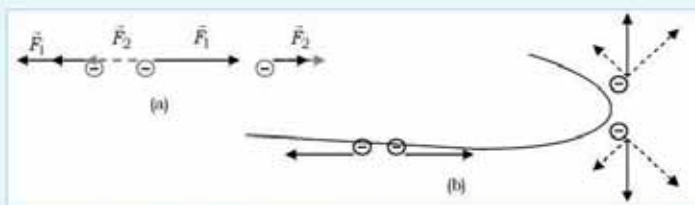
Sifat-sifat di atas hanya berlaku untuk konduktor yang keadaannya betul-betul statis, yaitu setelah muatan terdistribusi sepanjang permukaan, muatan-muatan tersebut betul-betul diam.



Gambar 5.13 Menunjukkan bahwa jumlah garis medan listrik pada muatan titik sebanding dengan besar muatan



Gambar 5.14 Medan listrik dan konduktor (a) Konduktor bermuatan dalam kondisi statis hanya mempunyai medan listrik yang arahnya selalu tegak lurus pada permukaan konduktor (b) Pada konduktor bermuatan yang bentuknya tidak teratur, terkumpul pada bentuk permukaan yang runcing.



Gambar 5.15 (a) Muatan yang terletak pada permukaan datar saling tolak menolak, (b) muatan yang terletak pada permukaan runcing, komponen gaya yang tegak lurus mempertahankan muatan saling bersekatan

Penalaran tentang terjadinya pengumpulan muatan untuk konduktor tak teratur pada bagian yang runcing adalah sebagai berikut: misalnya mula-mula terdapat banyak muatan sejenis pada bagian konduktor yang permukaannya mempunyai kelengkungan kecil (hampir datar), maka setiap dua muatan yang berdekatan saling tolak menolak. Seperti terlihat pada gambar 5.15(a), tiga buah muatan negatif yang sama besar dan terisolasi dari lingkungannya, tetapi jarak antara dua buah muatan yang berturutan tidak sama besar, maka muatan yang ditengah akan mengalami resultan gaya yang arahnya searah dengan \vec{F}_1 . Resultan gaya ini akan menyebabkan muatan yang di tengah akan bergerak ke kanan, muatan yang terkiri bergerak ke kiri dan muatan yang terkanan bergerak ke kanan. Setelah masing-masing bergerak sedemikian diperoleh kondisi resultan muatan pada muatan yang ditengah menjadi nol, yaitu bila jarak dua muatan yang berturutan sama besar dan cukup jauh. Dengan cara yang sama diambil tiga muatan yang berturutan berikutnya maka muatan yang tengah selalu diam. Hal ini dilakukan untuk seluruh muatan, sehingga dapat disimpulkan bahwa pada bagian konduktor yang hampir datar jarak antara dua muatan yang berturutan cukup jauh, masing-masing muatan dalam kondisi diam, dan arah garis medan selalu tegak lurus permukaan.

Sedangkan pada permukaan konduktor yang kelengkungannya besar gaya tolak-menolak pada masing-masing muatan diuraikan sejajar permukaan dan tegak lurus permukaan. Komponen yang tegak lurus permukaan lebih besar daripada yang sejajar, maka gaya tolak-menolak yang sejajar permukaan hanya kecil saja dan tidak mampu menjauhkan muatan satu sama lain cukup jauh. Sehingga membuat muatan tetap mengumpul pada ujung yang runcing bila konduktor bermuatan mempunyai bentuk tidak teratur, lihat gambar 5.15(b).

Berdasarkan diskusi di atas, maka medan listrik di dalam konduktor adalah nol, semua muatan yang terkandung dalam konduktor akan terdistribusi pada seluruh permukaan konduktor dan dalam kondisi statis. Untuk sebuah konduktor bola bermuatan, semua muatan terdistribusi pada permukaan bola secara merata dan tetap diam. Kondisi muatan yang diam dan stabil ini disebut kesetimbangan elektrostatik. Karena simetri, maka besarnya kuat medan listrik pada semua titik yang berjarak r dari pusat bola di mana $r > R$, R jari-jari bola, sama besar dan semua muatan seolah-olah terkonsentrasi pada pusat bola maka $E = \frac{kQ}{r^2}$, di mana Q adalah muatan bola konduktor. Besarnya kuat medan listrik tepat di permukaan bola adalah

$$E = \frac{kQ}{R^2} \quad (5.8)$$

Rapat muatan permukaan persatuan luas pada bola tersebut adalah

$$\sigma = \frac{Q}{4\pi R^2} \quad (5.9)$$

Besarnya kuat medan listrik dapat dinyatakan sebagai

$$E = 4\pi k\sigma \quad (5.10)$$

Jadi dapat disimpulkan bahwa besarnya medan listrik pada permukaan konduktor bola bermuatan hanya tergantung pada rapat muatan permukaan.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan sosial** kalian, lakukanlah kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Diskusikan dengan teman-temanmu bagaimana besar medan listrik pada permukaan bola bila sejumlah muatan yang sama besar ditempatkan pada bola yang ukurannya berbeda-beda? Bagaimana cara menjelaskan bahwa rapat muatan permukaan pada bola yang ukurannya kecil (tentu saja kelengkungan permukaannya besar) lebih besar daripada bola yang ukurannya lebih besar, jika keduanya mempunyai muatan sama besar? Apakah kondisi tersebut bisa digunakan sebagai dasar untuk menjelaskan bahwa pada konduktor yang tak teratur muatannya terkumpul pada permukaannya yang kelengkungannya besar?

2. Kilat

Pada waktu musim hujan sering terjadi petir yang sambar menyambar. Sebelum ada petir selalu didahului dengan adanya lucutan muatan listrik yang bergerak sangat cepat membelah udara dekat awan dan biasanya disebut kilat. Pada saat terjadi badai awan dan atau hujan deras, di mana awan hitam yang bergulung-gulung, terjadi pemisahan muatan listrik yang terkandung di dalam awan, bagian atas awan bermuatan positif dan bagian bawah awan bermuatan negatif. Sebagai akibatnya terjadi induksi muatan listrik positif pada permukaan bumi (tanah). Karena ada perbedaan jenis muatan antara awan dan tanah, maka terjadilah loncatan muatan negatif dari awan ke tanah. Loncatan muatan tersebut menyebabkan terjadinya ionisasi udara yang dilewati yang terlihat sebagai kilat.

Salah satu teori yang menjelaskan terjadinya pemisahan daerah yang bermuatan positif dan negatif adalah bila awan menjadi sangat dingin, molekul air terurai menjadi ion positif dan ion negatif. Ion positif lebih dingin, membentuk es dan menempati lapisan bagian luar, sedangkan muatan negatif yang lebih panas berada di lapisan bagian dalam dan bersifat cair. Bila awan menjadi lebih dingin lagi, maka ruangan muatan negatif lapisan dalam mulai membeku dan volumenya mengembang sehingga menghancurkan lapisan bagian luar yang bersifat es dan menyebabkan lapisan luar pecah. Karena pecahan-pecahan lapisan luar yang bermuatan positif lebih ringan maka bergerak ke atas, sedangkan lapisan dalamnya yang bermuatan negatif masih utuh dan lebih berat maka bergerak ke bawah. Peristiwa inilah yang menyebabkan awan yang mendingin muatannya terpisah ke bagian bawah dan bagian atas. Walaupun di dalam juga terjadi loncatan muatan yang menyebabkan kilat, namun kilat dalam ini tidak bisa dilihat, yang terlihat adalah kilat yang terjadi karena loncatan muatan antarawan atau antara awan dengan permukaan bumi. Bentuk kilat terlihat bagaikan tangga karena loncatan muatan terjadi secara bertahap.



Gambar 5.16 Kilat polarisasi muatan pada awan menginduksi muatan terhadap permukaan bumi melewati benda-benda yang

Bila lintasan kilat (barisan muatan negatif) yang mirip tangga mendekati permukaan bumi, maka muatan positif naik ke atas baik yang berasal dari pohon, gedung tinggi atau permukaan tanah sehingga kedua kumpulan muatan tersebut saling kontak. Kemudian elektron pada tangga terbawah mengalir ke bumi dan diikuti oleh semua elektron di atasnya satu persatu. Hal ini dapat terjadi beberapa kali. Sentakan aliran muatan negatif yang berturutan dari yang terbawah sampai ujung atas menyebabkan lintasannya bersifat konduktif dan menghasilkan cahaya yang kita sebut kilat. Perpindahan muatan negatif tersebut juga mengionisasi udara yang dilewatinya dan berlangsung sekitar 0,5 s dan dapat terulang pada lintasan tangga yang sama sekitar 3 atau 4x.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan sosial** kalian, lakukanlah kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Mengapa kita tidak boleh berada di tengah sawah/ lapangan pada saat terjadi banyak kilat juga tidak boleh di bawah pohon yang tinggi?

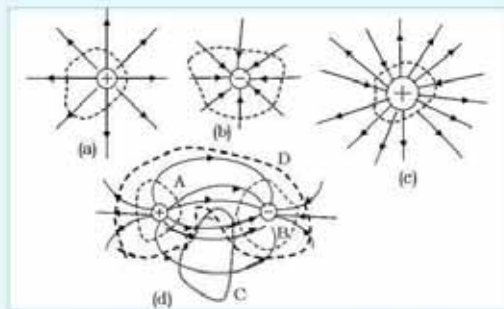
3. Hukum Gauss untuk Medan Listrik

Kita semua mengetahui bahwa fisika mempelajari tentang perilaku benda-benda di alam sekitar. Walaupun sudah berkembang jauh lebih pesat dari cabang ilmu alam yang lain, namun dalam pengembangannya untuk memperoleh konsep yang dapat menggambarkan perilaku benda-benda di alam selalu secara pendekatan, misal benda dianggap sebagai titik massa, sebagai batang atau benda-benda yang mempunyai bentuk simetri, seperti balok, kubus, bola, atau silinder, dan lain-lain. Pemilihan bentuk simetri ini mungkin disebabkan adanya benda-benda di alam yang menunjukkan simetri secara alami, sehingga mendorong orang-orang untuk menggunakan konsep simetri dan juga mengaplikasikannya untuk kehidupan sehari-hari.

Pada bab-bab sebelumnya kita telah mempelajari betapa bermanfaatnya Hukum Coulomb untuk mempelajari interaksi antar muatan listrik statik. Namun Coulomb tidak meninjau sama sekali tentang benda yang mempunyai sifat simetri. Gauss menyelidiki interaksi antara muatan pada suatu benda, baik benda berupa titik, batang, luasan (plat/lempeng), bola atau silinder dengan menggunakan

sifat simetri benda tersebut. Gauss mengusulkan hipotesis tentang adanya permukaan Gaussian yang melingkupi suatu distribusi muatan dan bentuknya cenderung simetri dan tertutup sehingga dapat membedakan daerah di dalam, pada, dan di luar permukaan. Prinsip hukum Gauss menunjukkan hubungan antara medan listrik pada permukaan Gaussian dengan besar distribusi muatan yang dilingkupinya.

Secara sederhana permukaan Gaussian untuk beberapa benda bermuatan diilustrasikan pada gambar 5.17. Permukaan Gaussian digambarkan sebagai garis putus-putus yang tertutup. Pada gambar 5.17(a), Sebuah partikel bermuatan positif yang dilingkupi oleh permukaan tertutup (luasan gaussian). Karena bermuatan positif maka garis-garis medan meninggalkan (keluar dari) muatan dan garis medannya dikatakan positif, hal ini sesuai dengan jenis muatan yang terkandung dalam permukaan gaussian. Tetapi pada gambar 5.17(b), arah garis medannya masuk karena muatan yang terkandung di dalam permukaan gaussian negatif dan garis medan yang masuk diberi tanda negatif. Pada gambar 5.17(c) ada garis medan yang keluar dan ada yang masuk maka jumlah total garis medan adalah jumlah yang keluar dikurangi yang masuk. Bila hasilnya positif berarti di dalam permukaan gaussian terdapat muatan positif.



Gambar 5.17 *Permukaan khayal Gaussian dan garis-garis medan listrik dari titik muatan*

Pada gambar 5.17(d) pada permukaan D, jumlah garis medan yang keluar sama dengan jumlah yang masuk, maka muatan total dalam luasan D adalah nol, demikian juga pada luasan C, jumlah garis medan yang masuk sama dengan yang keluar maka muatan total yang dilingkupi permukaan tertutup C juga nol. Jadi, dapat disimpulkan dalam hukum Gauss bahwa "jumlah netto garis-garis

gaya listrik yang melewati permukaan khayal gaussian sebanding dengan besarnya muatan yang dilingkupi oleh permukaan gaussian tersebut. Ukuran jumlah netto garis-garis medan listrik yang melewati permukaan tertutup disebut dengan fluks listrik

Dari eksperimen ditunjukkan bahwa fluks listrik besarnya sebanding dengan kuat medan dan luas permukaan yang dilewati oleh garis medan tersebut,

$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{A} \quad (5.11)$$

Pada diskusi di atas dibicarakan garis medan dari suatu muatan yang melewati permukaan khayal gaussian. Seperti pada medan listrik, makin jauh dari titik muatan, kuat medannya mengecil, maka rapat garis medan mengecil bila permukaan bola tersebut jari-jarinya makin besar. Jumlah garis medan yang melewati seluruh permukaan selalu tetap dan disebut sebagai fluks medan listrik.

Untuk bentuk permukaan yang tidak teratur yang melingkupi muatan titik, maka permukaan tersebut dibagi menjadi permukaan-permukaan kecil yang datar yang mana dalam permukaan yang kecil dan datar tersebut dianggap garis medannya homogen, dan jumlah fluksnya sama dengan jumlah fluks dari masing-masing luasan. Secara matematik penjumlahan semua fluks yang melewati permukaan tertutup sembarang yang ditunjukkan pada gambar 5.17 dapat dituliskan menjadi

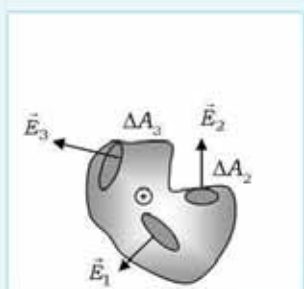
$$\Phi = \sum \vec{E}_i \cdot \Delta \vec{A} \quad (5.12)$$

Banyaknya permukaan yang kecil dan datar dapat dibuat tergantung pada permukaan sembarang, bila permukaannya lengkung maka jumlahnya bisa banyak. Bila bentuk permukaannya lengkung teratur seperti bola dan silinder, maka persamaan 5.12 dapat ditulis menjadi

$$\Phi = \oint \vec{E} \cdot d\vec{A} \quad (5.13)$$

Misalkan untuk sebuah titik muatan dengan muatan Q dilingkupi oleh permukaan tertutup berbentuk bola dengan jari-jari r dan muatan berada di pusat bola, maka persamaan 5.13 dapat ditulis menjadi

$$\Phi = \vec{E} \cdot \vec{A} \quad (5.14)$$



Gambar 5.18 Muatan titik yang dilingkupi oleh permukaan lengkung sembarang

Besarnya luasan permukaan bola $A = 4\pi r^2$, maka besarnya \vec{E} dari persamaan 5.5 adalah $\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$. Hubungan antara Φ dan besarnya muatan yang dilingkupi oleh permukaan A adalah

$$\Phi = \frac{Q}{\epsilon_0} \quad (5.15)$$

Persamaan 5.14 dapat diaplikasikan untuk sebarang bentuk permukaan tertutup yang melingkupi muatan Q di sembarang titik selama titik muatan tersebut di dalam permukaan tertutup. Demikian juga penerapan persamaan 5.15 juga dapat diperluas bukan hanya untuk satu titik muatan. Bila suatu permukaan tertutup S melingkupi beberapa titik muatan $Q_1, Q_2, Q_3, Q_n, \dots, Q_n$, maka jumlah total fluks listrik yang melewati permukaan tertutup S yang melingkupi semua muatan tersebut adalah

$$\Phi = \left(\frac{Q_1}{\epsilon_0} + \frac{Q_2}{\epsilon_0} + \frac{Q_3}{\epsilon_0} + \dots + \frac{Q_n}{\epsilon_0} \right) = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{\epsilon_0} \quad (5.16)$$

Dengan menyamakan persamaan 5.15 dengan persamaan 5.14 atau dengan persamaan 5.13 diperoleh $\Phi = \frac{Q}{\epsilon_0} = \vec{E} \cdot A$ untuk bentuk permukaan teratur khusus atau $\Phi = \frac{Q}{\epsilon_0} = \oint \vec{E} \cdot dA$ untuk permukaan teratur umum. Persamaan 5.15 dapat diganti dengan persamaan 5.16 untuk sistem yang terdiri dari beberapa titik muatan.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 5.6

1. Sebuah partikel bermuatan $+5 \times 10^{-10}$ C. Tentukan besarnya medan listrik pada sebuah titik yang berjarak 5 cm, 10 cm dan 20 cm dari partikel bermuatan tersebut!

Penyelesaian:

Untuk menentukan medan listrik pada sebuah titik yang disebabkan oleh titik muatan dapat digunakan persamaan 5.5, besarnya $E = k Q / (r^2)$, $Q = +5 \times 10^{-10}$ C, $r = 5$ cm, 10 cm dan 20 cm, besarnya $k = 9 \times 10^9$ (N.m²)/(C²), maka untuk $r = 5$ cm = 5×10^{-2} m diperoleh $E = \{ (9 \times 10^9) \text{ (N.m}^2\text{)/(C}^2\text{)} \} \times (+5 \times 10^{-10} \text{ C}) / (5 \times 10^{-2} \text{ m})^2$ $E = 1,8 \times 10^3$ N/C

Dengan cara yang sama untuk $r = 0,1$ m, besarnya $E = 450$ N/C dan untuk $r = 0,2$ m, besarnya $E = 112,5$ N/C.

2. Seperti pada soal no. 1. tetapi dengan menggunakan pernyataan hukum Gauss.

Penyelesaian:

Karena permukaan yang melingkupi muatan berbentuk bola dengan jari-jari tertentu, dan arah garis medan listrik sejajar dengan arah normal permukaan bola, maka $E \cdot \vec{A} = EA$, di mana E adalah besarnya vektor medan listrik \vec{E} dan \vec{A} adalah besarnya vektor luasan \vec{A} , maka kita gunakan persamaan 5.14 dan persamaan 5.15 sebagai berikut:

$E A = \frac{Q}{\epsilon_0}$ maka $E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r^2}$. Dari perhitungan juga diperoleh hasil sebagai untuk $r = 5$ cm $= 5 \times 10^{-2}$ m, $E = 1,8 \times 10^3$ N/C untuk $r = 0,1$ m, besarnya $E = 450$ N/C dan untuk $r = 0,2$ m, besarnya $E = 112,5$ N/C

3. Potongan-potongan plastik yang bermuatan listrik ditunjukkan pada gambar 5.19. Bila $Q_1 = Q_4 = +3,1$ nC, $Q_2 = Q_5 = -5,9$ nC dan $Q_3 = -3,1$ nC, tentukan besarnya fluks listrik netto yang melewati permukaan tertutup S!

Penyelesaian:

Di dalam permukaan tertutup S hanya terdapat 3 muatan Q_1 , Q_2 dan Q_3 . Maka berdasarkan persamaan 5.15, besarnya fluks listrik adalah sebanding dengan besarnya muatan yang dilingkupinya yang berarti jumlah total muatan di dalamnya,



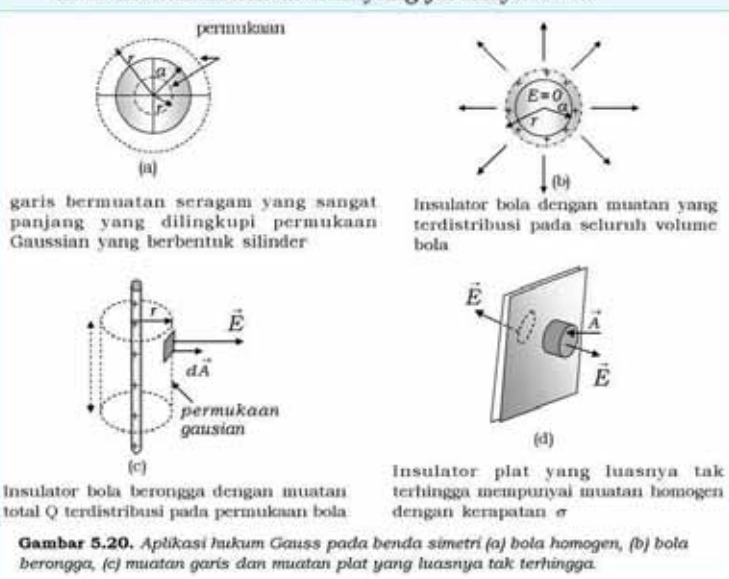
Gambar 5.19. Potongan gumpalan plastik yang bermuatan untuk contoh soal no. 3

$$\Phi = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{\epsilon_0} =$$

$$\frac{(3,1 - 5,9 - 3,1)10^{-9} \text{C}}{8,85 \cdot 10^{-12} \text{C}^2/\text{N.m}^2} = -670 \text{ N.m}^2/\text{C}$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa fluks listrik netto yang melewati permukaan S masuk ke dalam S.

4. Sebuah bola yang jari-jarinya a mempunyai muatan positif yang tersebar secara seragam dengan rapat muatan dan muatan totalnya Q dan terisolasi. (a). Tentukan kuat medan listrik di titik yang jaraknya $r > a$! (b). Tentukan kuat medan listrik di titik yang jaraknya $r < a$!



Penyelesaian:

Karena muatan tersebar dalam bola yang simetrik, maka kita gunakan persamaan 5.13 dan menganggap bahwa semua muatan terkonsentrasi di pusat bola. Besarnya kuat medan listrik di titik yang berjarak r dari pusat bola untuk $r > a$ adalah

$$E = k \frac{Q}{r^2} \quad (5.17)$$

Sedangkan untuk kuat medan listrik di dalam bola dapat ditentukan sebagai berikut. Besarnya muatan total Q dapat

dinyatakan sebagai, $Q = \rho \times \frac{4}{3} \pi a^3$ atau $\rho = \frac{Q}{\frac{4}{3} \pi a^3}$. Dengan

demikian besarnya muatan total dalam bola yang berjari-jari $r < a$, $Q' = \rho \times \frac{4}{3}\pi r^3$ adalah $\frac{Q}{\frac{4}{3}\pi a^3} \times \frac{4}{3}\pi r^3 = Q \frac{r^3}{a^3}$ dan harga dA untuk semua permukaan bola yang jari-jarinya r adalah $A = 4\pi r^2$, maka persamaan 5.13 ditulis menjadi $\oint E dA = E \oint dA = E \times 4\pi r^2 = \frac{Q'}{\epsilon_0}$ sehingga diperoleh besarnya kuat medan listrik di titik $r < a$

$$E = \frac{Q r^3}{\epsilon_0 a^3} = \frac{Qr}{4\pi\epsilon_0 a^3} = k \frac{Qr}{a^3} \quad (7.18)$$

Persamaan 5.18 menunjukkan bahwa besarnya kuat medan listrik di dalam bola yang bermuatan homogen berbanding lurus dengan jarak titik tersebut terhadap pusat bola. Besar kuat medan maksimum dialami titik yang tepat berada di permukaan bola yang besarnya dapat ditentukan dengan persamaan 5.17 atau 5.18 untuk $r = a$.

Kreasi Fisika

1. Buatlah grafik yang menunjukkan kuat medan listrik sebagai fungsi posisi untuk bola di atas!
2. Bila sebuah elektron yang bermuatan negatif, tunjukkan bahwa elektron melakukan gerak harmonik dalam bola di atas!

Untuk bola berongga, jari-jari a , yang bermuatan positif sebesar Q , maka semua muatan didistribusikan pada permukaan bola. Menurut hukum Gauss, fluks garis gaya medan listrik sebanding dengan muatan. Bila tidak ada muatan, maka fluksnya nol. Karena di dalam bola tidak ada muatan, maka fluks garis gaya listrik di dalam bola nol sehingga medan listrik di dalam bola nol. Sedangkan untuk medan untuk titik-titik yang terletak di luar bola, kita dapat membuat permukaan gaussian dengan jari-jari r dari pusat bola dan muatan bola dianggap terkumpul di pusat bola. Maka besarnya kuat medan listrik di titik yang berjarak $r > a$ adalah sama dengan kuat medan yang dihasilkan oleh muatan titik yaitu $E = k \frac{Q}{r^2}$, $r > a$

Contoh Soal 5.7

1. Tentukan kuat medan listrik pada titik yang berjarak r dari muatan yang tersebar secara seragam pada sebuah garis lurus dengan muatan per satuan panjang!

Penyelesaian:

Semua titik yang berjarak r dari garis muatan tersebut terletak pada permukaan lengkung yang merupakan permukaan silinder. Luas dan kuat medan pada semua titik di permukaan silinder tersebut sama besar, karena medan listrik dari muatan yang tersebar secara seragam juga seragam. Dengan menggunakan hukum Gauss,

persamaan 5.13 diperoleh $E \times 2\pi r\ell = \frac{\lambda\ell}{\epsilon_0}$. Diperoleh

$$E = \frac{\lambda}{2\pi\epsilon_0 r} = \frac{2k\lambda}{r} \quad (5.19)$$

Dari persamaan 5.19 dapat dilihat bahwa besarnya kuat medan listrik di sekitar distribusi muatan yang berupa garis berbanding terbalik dengan jarak titik tersebut terhadap muatan garis.

2. Tentukan besarnya kuat medan listrik yang dihasilkan oleh pelat insulator yang luasnya tak terhingga dan muatan terdistribusi secara seragam dengan rapat muatan per satuan luas!

Penyelesaian:

Agar fluks garis gaya medan yang melewati permukaan gaussian simetris dengan pelat insulator, maka garis-garis gaya medan tersebut harus tegak lurus pada permukaan plat insulator, yang berarti arah medan listrik harus tegak lurus pada bidang plat. Karena bidang plat mempunyai dua sisi yaitu sisi depan dan belakang, maka arah medan listrik pada kedua sisi berlawanan. Untuk memudahkan penelaahan kuat medan listrik pada suatu titik di depan atau dibelakang plat, kita buat permukaan gaussian yang berupa silinder kecil, lihat gambar 5.20(d). Garis gaya listrik sejajar dengan selimut silinder, maka garis gaya medan hanya melewati penampang silinder

yang luasnya A . Karena pada sisi depan maupun belakang arah \vec{E} searah dengan arah \vec{A} , maka fluks garis gaya

total $\Phi = 2EA = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$. Dan diperoleh

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0} \quad (5.20)$$

Persamaan 5.20 menunjukkan bahwa besarnya medan listrik yang dihasilkan oleh plat yang luasnya tak terhingga hanya tergantung pada luasan plat tersebut.

4. Konduktor dalam Keseimbangan Elektrostatis

Konduktor yang baik seperti tembaga mempunyai elektron-elektron yang bebas bergerak dalam material. Bila tidak terdapat muatan neto yang bergerak di dalam material, maka material tersebut dikatakan dalam keseimbangan elektrostatis. Sifat-sifat konduktor dalam keseimbangan elektrostatis adalah:

1. Medan listrik di dalam konduktor adalah nol.
2. Bila pada konduktor terdapat kelebihan muatan (bermuatan), maka kelebihan muatan tersebut semuanya akan menempati permukaan konduktor.
3. Medan listrik di luar permukaan konduktor bermuatan tegak lurus terhadap permukaan konduktor dan besarnya adalah

$\frac{\sigma}{\epsilon_0}$ di mana σ adalah muatan persatuan luas.

4. Pada konduktor bermuatan yang bentuknya sembarang muatan cenderung mengumpul pada daerah yang kelengkungannya besar (jari-jarinya kecil).

Medan listrik dari pelat konduktor yang luas, muatannya didistribusikan secara homogen. Besarnya medan listrik pada plat konduktor yang mempunyai kerapatan muatan dapat ditentukan seperti pada plat insulator, tetapi garis gaya medan listrik hanya

berasal dari satu sisi, bidang muka saja $\Phi = EA = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$ maka

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} \quad (5.21)$$

Kalian dapat membedakan medan listrik yang dihasilkan oleh plat (keping) yang luas yang bersifat insulator dan konduktor. Persamaan 5.21 adalah kuat medan listrik yang dihasilkan oleh plat konduktor sedangkan persamaan 5.20 oleh plat insulator.

Brilian

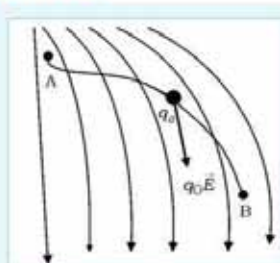
Setelah memahami medan listrik yang dihasilkan oleh bola insulator dan dengan menggunakan sifat-sifat muatan dalam konduktor selesaikan soal berikut: Sebuah bola pejal yang jari-jarinya mempunyai muatan positif sebesar $4Q$ diletakkan dalam bola konduktor berongga yang jari-jari dalamnya b ($b > a$) dan jari-jari luarnya c ($c > b$). Bila bola berongga tersebut muatan totalnya $-2Q$, gunakan hukum Gauss untuk menentukan kuat medan di titik A yang jari-jarinya r , $r < a$, di titik B di mana $a < r_B < b$, di titik C di mana $b < r_C < c$ dan di titik D di mana $r_D > c$.

D. Potensial Listrik, Energi dan Kapasitansi Listrik

Biasanya kita menyadari adanya kelistrikan bila terjadi sesuatu yang salah dan bahkan berbahaya, misalnya kabel yang terbakar, tersengat listrik karena hubungan pendek, percikan bunga api listrik yang berwarna biru. Bila seseorang menyentuh bola logam bermuatan listrik yang bertegangan ribuan volt, rambut orang tersebut akan terburai sebab rambutnya bermuatan sejenis, hal ini tampaknya tidak berbahaya. Tetapi kalau kita memegang kabel yang terkelupas pada kabel setrika, pasti kita akan shok padahal tegangan setrika hanya 220 V.

1. Energi Potensial Listrik dan Beda Potensial

Konsep energi potensial listrik sangat berguna untuk menjelaskan gejala-gejala kelistrikan, karena gaya elektrostatis adalah gaya konservatif. Dengan konsep energi potensial listrik kita dapat mendefinisikan potensial listrik yang merupakan besaran skalar. Karena potensial listrik adalah besaran skalar yang hanya merupakan fungsi posisi saja, maka gejala elektrostatis lebih mudah dijelaskan dengan konsep potensial daripada konsep gaya listrik.



Gambar 5.21 Muatan uji q_0 yang digerakkan dalam medan listrik E dari titik A ke B

Bila sebuah muatan uji diletakkan dalam medan listrik \vec{E} , maka muatan uji tersebut mengalami gaya sebesar $\vec{F} = q_0 \vec{E}$. Bila muatan uji bergerak sepanjang $d\vec{s}$, maka besarnya kerja yang dilakukan oleh gaya $\vec{F} = q_0 \vec{E}$ dapat dituliskan sebagai

$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = q_0 \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (5.22)$$

Bila pada sebuah benda hanya dikerjakan gaya konservatif, maka kerja yang dikerjakan pada benda sama dengan pengurangan energi potensial benda. Dengan demikian, kerja yang dilakukan oleh gaya Coulomb pada muatan uji sama dengan pengurangan energi potensial muatan uji tersebut. Perubahan energi potensial yang dialami muatan uji yang berpindah sejauh $d\vec{s}$ sama dengan negatif dari kerja pada muatan uji tersebut, yaitu

$$dU = -q_0 \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (5.23)$$

Bila muatan uji berpindah pada lintasan tertentu, misalnya dari titik A ke titik B, lihat gambar 5.21, maka besarnya perubahan energi potensial yang dialami muatan uji adalah

$$\Delta U = U_B - U_A = -q_0 \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (5.24)$$

Integral pada persamaan 5.24 dievaluasi sepanjang lintasan yang dilewati q_0 dari titik A ke titik B dan disebut sebagai integral lintasan. Nilai integralnya tidak tergantung pada bentuk lintasan tetapi hanya tergantung pada posisi awal dan akhir.

Beda potensial listrik antara dua titik A dan B, $V_B - V_A$, yang didefinisikan sebagai perubahan energi potensial antara A dan B dibagi dengan muatan uji q_0 adalah

$$V_B - V_A = \frac{U_B - U_A}{q_0} = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (5.25)$$

Pada persamaan 5.25 ditunjukkan bahwa beda potensial sebanding dengan energi potensial, di mana $\Delta U = q_0 \Delta V$. Karena energi potensial adalah skalar, maka potensial listrik juga skalar. Karena perubahan energi potensial sama dengan harga negatif dari kerja yang dilakukan oleh gaya listrik, maka beda potensial didefinisikan sebagai kerja per satuan muatan yang harus dilakukan oleh gaya luar untuk memindahkan muatan uji tanpa mengalami perubahan energi kinetik. Persamaan 5.20 mendefinisikan beda potensial saja. Bila potensial listrik di titik yang letaknya tak terhingga adalah nol, maka $V_A = 0$ dan persamaan 5.25 menjadi

$$V = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} \quad (5.26)$$

Persamaan 5.25 dapat diartikan sebagai potensial listrik pada sembarang titik sama dengan kerja yang diperlukan per satuan muatan positif untuk membawa (memindahkan) muatan uji positif dari tak terhingga ke titik tersebut.

Dari persamaan 5.26 dapat dilihat bahwa satuan SI untuk beda potensial adalah joule/coulomb (J/C) atau disebut volt (V). Jadi $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$.

Satuan dalam SI untuk beda potensial yang dinyatakan dalam volt dimaksudkan untuk menghormati seorang ilmuwan dari Itali pada abad ke 18, yaitu Alessandro Volta. Beda potensial listrik kadang-kadang disebut sebagai tegangan dan diberi simbol ΔV atau hanya V .

Karena beda potensial didefinisikan sebagai energi potensial per satuan muatan, beda potensial tidak tergantung pada berapa banyak muatan yang dipindahkan.

2. Beda Potensial pada Medan Listrik Seragam

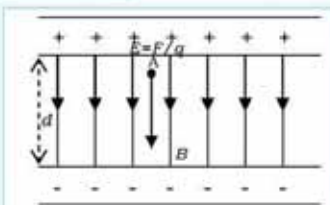
Analisis beda potensial listrik dapat dimulai dari pola medan listrik yang sederhana, misalnya medan antara dua pelat sejajar dengan muatan yang berlawanan dan jarak kedua pelat cukup besar. Besarnya medan listrik antara kedua plat tersebut adalah E dan bersifat seragam. Dekat dengan pusat antara dua pelat terdapat medan yang homogen baik arah dan besarnya, lihat gambar 5.24. Beda potensial antara titik A dan B yang terletak di dalam medan yang seragam dan berjarak d yang searah dengan arah medan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 5.25.

$$V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s} = - \int_A^B E \cos \theta ds = -E \int_A^B ds = -Ed \quad (5.27)$$

Tanda negatif menunjuk fakta bahwa dari gambar 5.24 potensial di titik B lebih rendah daripada potensial listrik di titik A. Misalkan muatan uji bergerak dari A ke B, maka besarnya perubahan energi potensial dapat ditentukan dari persamaan 5.25) dan 5.27 sebagai

$$\Delta U_e = U_B - U_A = -q_0 Ed \quad (5.28)$$

Dapat dilihat pada persamaan 5.28 bahwa bila q_0 positif, maka perubahan energi potensial negatif, hal ini berarti muatan positif kehilangan sebagian energi potensialnya pada saat bergerak searah dengan arah medan listrik. Hal ini sejalan dengan sebuah titik massa akan



Gambar 5.22 Medan listrik antara dua keping sejajar yang muatannya berlawanan

kehilangan sebagian energi potensialnya bila massa tersebut bergerak searah dengan arah medan gravitasi. Jadi, bila muatan positif dilepaskan di dalam medan listrik, maka muatan tersebut akan bergerak searah medan dan mengalami percepatan sehingga mengalami pertambahan energi kinetik yang besarnya sama dengan pengurangan energi potensial.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, kerjakan tugas berikut!

Tugas 5.2

Bila muatan uji adalah muatan negatif dan dilepaskan dalam medan pada gambar 5.22, kemana muatan uji bergerak? Bagaimanakah perubahan potensialnya dan perubahan energi potensialnya?

Bagaimanakah besarnya potensial listrik semua titik yang terletak pada bidang yang tegak lurus terhadap garis gaya medan? Kalian bisa menunjukkan bahwa semua titik yang terletak pada bidang yang tegak lurus pada garis gaya medan mempunyai potensial yang sama besar dan bidang ini disebut bidang ekipotensial.

Contoh Soal 5.8

Sebuah elektron dalam tabung vakum dipercepat dari keadaan diam melalui beda potensial sebesar $\Delta V = 200\text{V}$. a) Berapa perubahan energi potensial elektron? b) Berapa kelajuan elektron akibat percepatan tersebut?

Penyelesaian:

- Muatan pada sebuah elektron adalah $e = -1,6 \times 10^{-19}\text{ C}$. Berdasarkan persamaan 5.25, energi potensialnya adalah $\Delta U = q\Delta V = (-1,6 \times 10^{-19}\text{ C}) \times (200\text{ V}) = -3,2 \times 10^{-17}\text{ J}$, (tanda negatif menunjukkan bahwa energi potensialnya berkurang atau menurun).
- Hilangnya energi potensial berubah menjadi energi kinetik, yang mana menurunnya energi potensial diikuti oleh kenaikan energi kinetik (ΔE_k). Jadi, dalam hal ini perubahan energi potensial sama dengan perubahan energi kinetik,

$$\Delta U = \Delta E_k \rightarrow q\Delta V = \frac{1}{2}mv^2 - 0$$

$$v = \sqrt{\frac{2q\Delta V}{m}} \rightarrow 8,4 \times 10^6 \text{ m/s}$$

di mana energi kinetik elektron awal adalah nol (keadaan elektron mula-mula adalah diam).

Elektron yang dipercepat dengan beda potensial 200 V akan menghasilkan kelajuan sebesar 2,8% kelajuan cahaya.

Contoh Soal 5.9

Sebuah elektron diinginkan untuk mencapai kelajuan 1,00% c dalam sebuah ruangan yang terbuat dari sepasang plat sejajar yang horisontal dan berjarak 2,5 mm. Jika muatan positif berada pada bagian atas, a) berapa beda potensial yang diperlukan antar plat? b) berapa besar dan arah medan listrik? (Mengapa pengaruh gravitasi tidak kita perhatikan?)

Penyelesaian:

Satu persen kelajuan cahaya adalah $(0,0100)(3,00 \times 10^8 \text{ m/s}) = 3 \times 10^6 \text{ m/s}$

- a. Elektron mestinya dilepas dari pelat bagian bawah, mengapa? Kenaikan energi kinetik elektron adalah,

$$E_k = \frac{1}{2}m_e v_e^2 = \frac{1}{2}(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})(3,00 \times 10^6 \text{ m/s})^2 = 4,10 \times 10^{-18} \text{ J}$$

Kenaikan energi kinetik ini tidak lain sama dengan penurunan energi potensial, jadi $\Delta U = -\Delta E_k$.

Jadi, beda potensial antara dua pelat sejajar adalah,

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} = \frac{-4,10 \times 10^{-18} \text{ J}}{-1,60 \times 10^{-19} \text{ C}} = 25,6 \text{ V}$$

- b. Arah medan listrik vertikal dan arahnya ke bawah, besarnya medan listrik adalah,

$$E = \frac{\Delta V}{d} = \frac{25,6 \text{ V}}{2,50 \times 10^{-3} \text{ m}} = 1,03 \times 10^4 \text{ V/m}$$

3. Potensial Listrik Dan Energi Potensial Hasil Dari Muatan Titik

Di sekitar sebuah partikel yang bermuatan listrik positif q yang diisolasi, timbul medan listrik yang arahnya keluar secara radial dari muatan. Besarnya potensial listrik pada sebuah titik yang jaraknya r dari partikel bermuatan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 5.20 $V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$. Sedangkan kuat medan listrik pada sebuah titik yang berjarak r dari muatan menurut hukum Coulomb adalah $\vec{E} = k \frac{q}{r^2} \vec{r}_0$, di mana \vec{r}_0 adalah vektor satuan yang arahnya sama dengan arah medan listrik. Besarnya $\vec{E} \cdot d\vec{s} = k \frac{q}{r^2} \vec{r}_0 \cdot d\vec{s} = k \frac{q}{r^2} ds \cos \theta$, di mana θ adalah sudut antara \vec{r} dan $d\vec{s}$. Ditunjukkan pada gambar 5.23 bahwa $ds \cos \theta$ adalah proyeksi dari ds pada r , sehingga $ds \cos \theta = dr$. Dengan demikian beda potensial dapat ditulis menjadi

$$\begin{aligned} V_B - V_A &= -\int_A^B k \frac{q}{r^2} dr = -kq \int_{r_A}^{r_B} \frac{dr}{r^2} = \frac{kq}{r} \Big|_{r_A}^{r_B} \\ V_B - V_A &= kq \left[\frac{1}{r_B} - \frac{1}{r_A} \right] \end{aligned} \quad (5.29)$$

Telah diperlihatkan bahwa integral $-\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$ tidak bergantung lintasan A dan B, tetapi hanya tergantung pada titik awal dan titik akhir, maka dapat disimpulkan bahwa medan listrik dari muatan titik adalah konservatif seperti medan gravitasi yang disebabkan oleh massa titik. Dari persamaan 5.29 dapat didefinisikan besarnya potensial pada titik A yang jaraknya r_A dan di titik B yang jaraknya r_B dari partikel bermuatan positif sebagai

$$V_A = k \frac{q}{r_A} \text{ dan } V_B = k \frac{q}{r_B} \quad (5.30)$$

Seperti didefinisikan pada persamaan 5.25 dan 5.29, kita perlu memilih titik referensi dimana potensialnya bernilai nol, misalnya titik A sebagai referensi maka $r_A = \infty$ dan $V_A \sim 1/r_A$ dan $r_A \rightarrow \infty$, $V_A \rightarrow 0$. Jadi secara umum besarnya potensial listrik pada titik yang berjarak r dari partikel bermuatan positif dapat dinyatakan sebagai

$$V = k \frac{q}{r} \quad (5.31)$$

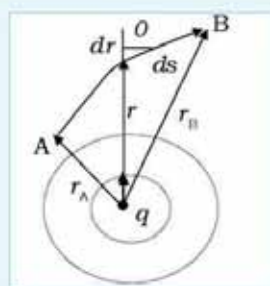
Persamaan 5.31 dapat diartikan bahwa besarnya potensial pada semua titik yang terletak pada kulit bola yang berjari-jari r dengan muatan q terletak di titik pusatnya. Tanda pada nilai potensial

listrik tergantung pada tanda muatan yang menghasilkan potensial tersebut. Karena semua titik pada permukaan bola mempunyai potensial yang sama, maka bidang permukaan bola disebut bidang ekipotensial dan bidang ini selalu tegak lurus pada garis-garis medan.

Potensial listrik yang dihasilkan oleh dua atau lebih muatan titik dapat ditentukan dengan menerapkan prinsip superposisi. Itu berarti bahwa potensial total yang dihasilkan oleh beberapa muatan titik adalah penjumlahan potensial dari masing-masing muatan individual yang dapat dinyatakan sebagai

$$V = k \sum_{i=1}^n \frac{q_i}{r_i} \quad (5.32)$$

Penjumlahan pada persamaan 5.32 adalah penjumlahan secara aljabar dari besaran skalar, tidak seperti pada kuat medan listrik total yang dihasilkan oleh beberapa muatan yang dijumlahkan secara vektor.



Gambar 5.23 Beda potensial antara titik A dan titik B yang disebabkan oleh muatan q hanya bergantung pada koordinat awal dan akhirnya.

Contoh Soal 5.10

Sebuah sistem terdiri dari 4 partikel bermuatan, masing-masing muatannya $Q_1 = +12 \text{ nC}$, $Q_2 = -24 \text{ nC}$, $Q_3 = +32 \text{ nC}$ dan $Q_4 = +18 \text{ nC}$. Keempat muatan tersebut terletak pada titik-titik sudut bujur sangkar yang rusuknya d . (a). Tentukan potensial di titik P, perpotongan diagonal bujur sangkar! (b) Tentukan energi potensial total dari sistem!

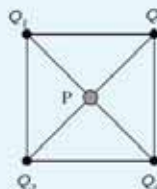
Penyelesaian

Dari data di atas diketahui : $Q_1 = +10 \text{ nC}$, $Q_2 = -20 \text{ nC}$, $Q_3 = +30 \text{ nC}$ dan $Q_4 = +15 \text{ nC}$. Jarak dari setiap muatan ke titik P adalah

$$r = \frac{1}{2}d\sqrt{2}$$

Ditanya :

V_p dan U total?



Jawab:

$$\begin{aligned}\text{Besarnya } V_p &= k \frac{Q_1}{\frac{1}{2}d\sqrt{2}} + k \frac{Q_2}{\frac{1}{2}d\sqrt{2}} + k \frac{Q_3}{\frac{1}{2}d\sqrt{2}} + k \frac{Q_4}{\frac{1}{2}d\sqrt{2}} \\ V_p &= \frac{2k}{d\sqrt{2}} (Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4) \\ &= \frac{2k}{d\sqrt{2}} (10 - 20 + 30 + 15) \text{ nC/m} \\ &= \frac{2k}{d\sqrt{2}} (35) \text{ nC/m} = \frac{70k}{d\sqrt{2}}\end{aligned}$$

4. Potensial Listrik dari Listrik Dipole

Dipol listrik didefinisikan sebagai sistem muatan yang terdiri dari dua muatan yang sama besar tetapi tandanya berlawanan dan terletak pada jarak tertentu d , lihat gambar 5.24. Besarnya potensial listrik pada titik P yang berjarak r_+ dari muatan positif dan berjarak r_- dari muatan negatif dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 5.32 sebagai

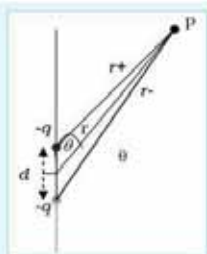
$$V_p = kq \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) = kq \frac{r_- - r_+}{r_+ r_-} \quad (5.33)$$

Dipol listrik adalah salah satu bentuk alami molekul yang terdiri dari dua atom, misalnya H_2 , O_2 , N_2 dan lain-lain. Maka secara umum pada gambar (5.24), $d \ll r$ sehingga $r_- - r_+ \approx d \cos \theta$ dan

$$r_+ r_- \approx r^2 \quad (5.34)$$

dimana θ adalah sudut antara vektor r dengan d , garis hubung antara muatan $+q$ dan $-q$. Dengan memasukkan persamaan 5.34 ke dalam persamaan 5.33 diperoleh

$$V_p = kq \frac{d \cos \theta}{r^2} = k \frac{p \cos \theta}{r^2} \quad (5.35)$$



Gambar 5.24 Listrik Dipol

Di mana $p = qd$ adalah besarnya momen dipol listrik dan arah vektor \vec{p} dari muatan negatif ke muatan positif, jadi arah momen dipol berlawanan dengan arah medannya.

Contoh Soal 5.11

Misal kita meletakkan 3 buah titik yang sangat jauh dari dipole, A terletak pada perpanjangan sumbu dipole arah ke atas, titik B terletak pada perpanjangan sumbu dipole arah ke bawah dan C terletak pada garis yang tegak lurus pada dan lewat titik tengah sumbu dipole. Urutkan dari ke tiga titik tersebut potensialnya dari terkecil ke terbesar!

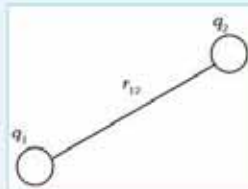
Penyelesaian:

Untuk menentukan potensial listrik pada masing-masing titik kita gunakan persamaan 5.35. Untuk titik A, $\theta = 0^\circ$, sedangkan untuk titik B, $\theta = 180^\circ$, dan untuk titik C, $\theta = 90^\circ$, maka

$$V_A = k \frac{p \cos 0}{r^2} = k \frac{p}{r^2}, \quad V_B = k \frac{p \cos 180^\circ}{r^2} = -k \frac{p}{r^2}, \quad \text{dan untuk} \\ V_C = k \frac{p \cos 90^\circ}{r^2} = 0. \text{ Jadi urutan besarnya potensial dari yang terkecil adalah } V_B, V_C, \text{ dan } V_A.$$

5. Energi Potensial Listrik dari Sistem Muatan Titik

Dua buah partikel bermuatan, masing-masing muatannya q_1 dan q_2 yang terpisah pada jarak r_{12} . Jika V_1 adalah potensial listrik yang dihasilkan oleh muatan q_1 pada titik P, maka kerja yang diperlukan untuk membawa muatan q_2 dari jauh tak hingga ke titik P tanpa percepatan adalah $q_2 V_1$. Karena kerja yang dilakukan gaya luar sama dengan energi potensial U dan bila titik P berimpit dengan q_2 , maka energi potensial yang dialami q_2 adalah

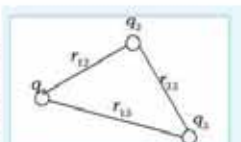


Gambar 5.25 Dua muatan q_1 dan q_2 terpisah pada jarak r_{12}

$$U = q_2 V_1 = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}} \quad (5.36)$$

Jika muatan bertanda sama, besarnya energi potensial pada masing-masing partikel bermuatan adalah positif, karena kerja harus dilakukan terhadap muatan untuk mendekatkannya yang saling tolak-menolak. Pada muatan berlawanan tanda harus dikerjakan gaya luar untuk melawan gaya tarik-menarik, maka energi potensialnya negatif. Jadi, energi potensial pada sistem yang terdiri dari dua partikel positif, jika muatannya senama dan negatif bila muatannya berlawanan,

Jika ada dua atau lebih partikel muatan dalam sistem, energi potensial sistem dapat dicari dengan menghitung U untuk setiap muatan dan menjumlahkan masing-masing energi potensial secara aljabar. Seperti pada contoh gambar 5.26, energi potensial total dari tiga muatan diberikan oleh:



Gambar 5.26 Tiga muatan terpisah pada jarak tertentu

$$U = k \left(\frac{q_1 q_2}{r_{12}} + \frac{q_2 q_3}{r_{23}} + \frac{q_1 q_3}{r_{13}} \right) \quad (5.37)$$

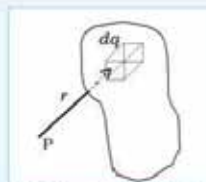
Dari persamaan 5.37 dapat diperluas untuk menentukan energi potensial sistem yang terdiri dari n partikel bermuatan sebagai,

$$U = k \left(\sum_{i=1}^n \frac{q_i q_i}{r_{1i}} + \sum_{i=2}^n \frac{q_2 q_i}{r_{2i}} + \sum_{i=3}^n \frac{q_3 q_i}{r_{3i}} + \dots \right) \quad (5.38)$$

Besarnya energi potensial total pada sistem n partikel ditentukan oleh penjumlahan secara aljabar energi potensial setiap sepasang partikel yang seolah-olah terisolasi dari yang lain.

6. Potensial Listrik yang Dihasilkan Distribusi Muatan Kontinyu

Potensial listrik yang dihasilkan oleh distribusi muatan dapat dihitung jika distribusi diketahui untuk potensial dari muatan titik. Kita harus mengambil elemen muatan kecil dq , yang dianggap sebagai muatan titik gambar 5.27, maka potensial dV pada titik P yang dihasilkan oleh elemen muatan dq diberikan oleh:



Gambar 5.27 potensial listrik di titik P pada distribusi muatan dapat dihitung dengan membagi muatan menjadi segmen dq dan menjumlahkan kontribusi potensial masing-masing segmen

$$dV = k \frac{dq}{r} \quad (5.39)$$

di mana r adalah jarak dari elemen muatan dq ke titik P. Untuk menghitung potensial total di titik P, kita integralkan persamaan

$$5.38 \text{ sebagai } V = k \int \frac{dq}{r}$$

Contoh Soal 5.12

Tentukan besarnya potensial pada titik P yang berjarak d dari salah satu ujung garis dari distribusi muatan garis yang panjangnya L dengan muatan per satuan panjang λ !

Penyelesaian:

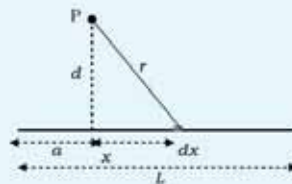
Besarnya potensial di titik P dapat dihitung dengan menggunakan pers $dq = \lambda dx$, adalah muatan pada elemen panjang dx , $r = \sqrt{d^2 + x^2}$ dan pers dapat ditulis menjadi

$$V = k \int_{-a}^{L-a} \frac{\lambda dx}{\sqrt{d^2 + x^2}}$$

Penyelesaian integral di atas dapat diperoleh dari tabel integral sebagai $V = k\lambda [\ln\{x + (d^2 + x^2)^{\frac{1}{2}}\}]_{-a}^{L-a}$

$$= k\lambda [\ln\{(L-a) + ((L-a)^2 + d^2)^{\frac{1}{2}}\} - \ln\{(-a) + (a^2 + d^2)^{\frac{1}{2}}\}]$$

$$= k\lambda \ln\left\{ \frac{(L-a) + ((L-a)^2 + d^2)^{\frac{1}{2}}}{(a^2 + d^2)^{\frac{1}{2}} - a} \right\}$$



7. Potensial Konduktor Bermuatan

Semua muatan pada sebuah konduktor yang terisolasi terdistribusi pada permukaan konduktor dan medan listrik di dalam konduktor adalah nol. Maka ruas kanan pada persamaan 5.27

$V_B - V_A = - \int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$ adalah nol, sehingga dapat dikatakan bahwa semua titik di dalam konduktor mempunyai potensial yang sama. Misalkan kita mempunyai sebuah konduktor bola dengan jari-jari R

meter dan muatannya q Coulomb. Untuk titik-titik di luar bola, besarnya potensial dapat ditentukan dengan persamaan 5.31 yang diperoleh dari pengintegrasian persamaan 5.27, dimana seolah-olah muatan terkonsentrasi pada pusat bola. Jadi, besarnya potensial pada sebuah titik yang berjarak $r > R$ dari pusat bola adalah $V = k \frac{q}{r}$

Misalkan kita mendorong masuk sesuatu muatan lewat lubang kecil di dalam bola, kita tidak melakukan kerja untuk menggerakkan muatan di dalam bola karena semua titik di dalam bola potensialnya sama dan besarnya sama dengan potensial pada titik tepat di dalam kulit bola, yaitu

$$V = k \frac{q}{R} \quad (5.38)$$

Contoh: Misalkan kita mempunyai sebuah konduktor bola dengan jari-jari 1 m dan muatannya $1 \mu\text{C}$, maka

$$V = k \cdot 1\mu\text{C} \quad \text{untuk } r = R \text{ atau } r < 1 \text{ m}$$

$$V = k \frac{1\mu\text{C}}{r} \quad \text{untuk } r > 1 \text{ m}$$

Bila konduktor bermuatan dimasukkan dalam suatu medan listrik luar yang potensialnya V konduktor tersebut seolah-olah sebagai titik muatan q , maka besarnya energi potensial pada konduktor tersebut tetap sama dengan qV .

E. Kapasitansi dan Dielektrik

Kapasitor adalah alat untuk menyimpan muatan. Kapasitor banyak digunakan untuk (1) penala frekuensi pesawat penerima, (2) filter power supply, (3) untuk mengeliminasi percikan bunga api pada sistem pengapian kendaraan, (4) menyimpan energi pada alat-alat elektronik. Kapasitor terdiri dari dua buah konduktor yang dipisahkan oleh insulator. Medan listrik yang berada antara konduktor yang bermuatan tersimpan sebagai energi listrik.

Perhatikan gambar 5.28, dua pelat konduktor sejajar. Dua plat konduktor yang diberi Q yang sama tetapi berlawanan tanda (yang satu +, lainnya -) dan diletakkan berdekatan disebut sebagai kapasitor. Kerja harus dilakukan supaya ada transfer muatan dari konduktor satu ke yang lainnya. Misal, ada satu elektron yang digerakan dari satu plat konduktor ke plat yang lainnya.

Ini diperlukan kerja luar karena muatan positif yang ditinggalkan oleh elektron berusaha menarik kembali. Untuk memindahkan elektron yang kedua akan lebih sulit karena elektron yang dipindahkan akan ditolak oleh elektron yang pertama dan ditarik oleh dua muatan positif yang ditinggalkan. Jadi, memindahkan atau memisahkan muatan memerlukan kerja yang besar. Peristiwa ini analogi dengan memompa udara dalam ban. Semakin banyak udara yang tersimpan dalam ban semakin sulit kalian memompanya.

Kerja untuk memindahkan muatan dalam pelat konduktor yang sejajar diperlukan energi dari luar yang dalam hal ini diperlukan sebuah baterai. Fungsi baterai diperlukan untuk memindahkan elektron dari pelat muatan positif dan transfer elektron melalui kawat penghantar ke plat negatif. Pemisahan muatan ini menimbulkan medan listrik dalam kapasitor.

Perbedaan potensial antara dua pelat berbanding lurus terhadap muatan q . Secara matematis dapat ditulis, $V \approx q$. Untuk menjadikan bentuk persamaan diperlukan konstanta pembanding C , $q = CV$ atau

$$C = \frac{q}{V} \quad (5.40a)$$

Persamaan 5.40a merupakan definisi kapasitas dengan satuan coulomb/volt atau farad (F). Dengan kata lain, C adalah kapasitas dan dinyatakan sebagai muatan yang tersimpan per satuan volt.

Kapasitas hanya tergantung pada bentuk geometri (ukuran, bentuk, dan jarak antar dua konduktor), susunan plat dan material antara ke dua plat. Untuk plat sejajar yang mempunyai luas sama (A) yang mana lebih besar dibandingkan dengan jarak antara kedua plat (d), besarnya kapasitas adalah,

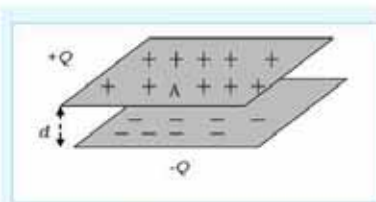
$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (5.40b)$$

Persamaan 5.40b hanya berlaku untuk kapasitas dengan dua pelat sejajar. ϵ_0 disebut permitivitas ruang hampa (vakum) yang mempunyai nilai $8,85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/\text{N.m}^2$. ϵ_0 adalah konstanta dasar yang

telah digunakan dalam hukum Coulomb, $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$.

1. Kapasitor Keping Sejajar

Kapasitor keping sejajar terdiri dari dua buah plat konduktor yang luasnya sama dan dipisahkan oleh jarak d , lihat gambar 5.28. Masing-masing keping muatannya $+Q$ dan $-Q$. Besarnya muatan per satuan luas adalah $\sigma = \frac{Q}{A}$.



Gambar 5.28 Kapasitor keping sejajar

Medan antara dua keping seragam, maka $E = \frac{\sigma}{\epsilon_0} = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$ dan besarnya beda potensial adalah $V = Ed = \frac{Qd}{\epsilon_0 A}$ besarnya kapasitas kapasitor keping sejajar menurut persamaan 5.39 adalah

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} \quad (5.41)$$

Persamaan 5.41 menunjukkan bahwa makin luas kepingnya, makin besar muatan yang tersimpan dalam kapasitor, makin dekat kedua keping konduktor terpisah, makin besar pula muatan yang tersimpan. Harus diingat bahwa harus dipertahankan agar tidak ada muatan yang berpindah dari konduktor yang satu ke konduktor yang lain. Medan listrik antara dua keping seragam pada bagian tengah dan sedikit tidak seragam pada bagian tepinya.

2. Kapasitor Berbentuk Silinder

Kapasitor silinder terdiri dari dua konduktor berbentuk silinder yang mempunyai sumbu yang sama. Silinder yang kecil berjari-jari a dan bermuatan $+Q$, sedangkan silinder yang lebih besar berjari-jari b dan bermuatan $-Q$. Dua silinder tersebut panjangnya ℓ . Maka menurut persamaan 5.25 besarnya beda potensial antara

kedua permukaan silinder adalah $V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{s}$ di mana \vec{E} adalah kuat medan pada daerah $a < r < b$. Menurut hukum Gauss, besarnya medan listrik antara kedua konduktor pada pers 5.24 adalah $\frac{2k\lambda}{r}$ di mana λ adalah muatan silinder per satuan

panjang dan r adalah gerak elemen ke sumbu silinder. Besarnya beda potensial kapasitor silinder yang diperoleh dari persamaan 5.25 dan dari daftar integral diperoleh

$$V_B - V_A = -\int_A^B E dr = -2k\lambda \int_a^b \frac{dr}{r} = -2k\lambda \ln \frac{b}{a} \quad (5.42)$$

Dengan demikian dari persamaan 5.41 dapat diperoleh besarnya kapasitas kapasitor silinder sebagai

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{2kQ}{\ell} \ln \frac{b}{a}} = \frac{\ell}{2k \ln \frac{b}{a}} \quad (5.43)$$

3. Kapasitas Kapasitor Bola

Sebuah kapasitor bola terdiri dari bola tipis konduktor yang berongga dengan jari-jari b dan bermuatan $-Q$. Didalamnya terdapat bola konduktor pejal yang lebih kecil dan konsentris berjari-jari a dan bermuatan $+Q$. Karena bola bersifat konduktor, maka medan listrik di dalam bola yang kecil adalah nol. Besarnya kuat medan listrik antara kedua bola yang konsentris dapat diperoleh dari hukum

Gauss dan sifat-sifat konduktor adalah $E = k \frac{Q}{r^2}$ dan arahnya radial ke luar yaitu searah dengan dr , maka beda potensial listrik antara kedua bola dengan menggunakan persamaan 5.25 adalah

$$V_B - V_A = -\int_a^b E dr = -kQ \int_a^b \frac{dr}{r^2} = kQ \left[\frac{1}{r} \right]_a^b = kQ \left(\frac{1}{b} - \frac{1}{a} \right)$$

Besarnya kapasitas kapasitor adalah

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{ab}{k(b-a)} \quad (5.44)$$

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan pesonal** kalian, kerjakan tugas berikut!

Tugas 5.3

Bila pada persamaan 5.44 jari-jari bola luar menjadi tak terhingga tunjukkan bahwa $C = 4\pi\epsilon_0 a$!

4. Energi Kapasitor

Bila keping-keping kapasitor yang bermuatan dihubungkan dengan kawat penghantar, muatan pada masing-masing keping mengalir ke keping yang lain, sehingga kedua keping menjadi tak bermuatan. Pelucutan muatan dari kapasitor dapat diamati sebagai bentuk percikan bunga api listrik.

Jika mula-mula kapasitor keping sejajar tak bermuatan maka beda potensial antara dua keping adalah nol. Kemudian hubungkan kapasitor dengan baterai sampai bermuatan maksimum Q , sehingga

beda potensial antara dua keping adalah $V = \frac{Q}{C}$

Karena beda potensial antara dua keping mula-mula adalah nol, maka rerata beda potensial selama proses pemuatan adalah

$$\bar{V} = \frac{V_{\text{akhir}} - V_{\text{awal}}}{2} = \frac{1}{2} V = \frac{Q}{2C}$$

Besarnya kerja yang diperlukan untuk memberi muatan pada kapasitor adalah

$$\begin{aligned} U = W &= q\bar{V} = \frac{1}{2}qV \\ U &= \frac{1}{2}qV = \frac{1}{2}CV^2 \end{aligned} \quad (5.45)$$

Untuk kapasitor keping sejajar, $V = Ed$ dan $C = \epsilon_0 A/d$. Dengan menggunakan persamaan 5.45, energi yang tersimpan dalam kapasitor keping sejajar adalah

$$U = \frac{1}{2} \frac{\epsilon_0 A}{d} (E^2 d^2) = \frac{1}{2} \epsilon_0 A d E^2 \quad (5.46)$$

Besarnya energi yang tersimpan dalam kapasitor per satuan volume adalah $U = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2$. Satuan rapat energi U dalam satuan SI adalah joule/m³.

5. Dielektrik

Sebagian besar kapasitor terdiri dari lembaran material insulator, seperti kertas atau plastik yang ditempatkan di antara kedua plat. Material insulator disebut dielektrik.

Bagaimana pengaruh dielektrik terhadap kapasitas kapasitor diselidiki dengan menggunakan peralatan yang ditunjukkan pada gambar 5.29.

Pada gambar 5.29 ditunjukkan bahwa mula-mula kapasitor keping sejajar yang tanpa dielektrik mempunyai muatan Q_0 dan kapasitansya adalah C_0 . Beda potensial antara kedua keping dapat diukur dan besarnya adalah

$$V_0 = \frac{Q_0}{C_0}.$$

Pada saat mengukur beda potensial antara dua keping, sirkit kapasitor dikatakan terbuka, karena antara dua keping/plat tidak dihubungkan dengan baterai dan arus tidak mengalir lewat voltmeter. Kemudian di antara keping kapasitor dimasukkan material yang bersifat dielektrik dan beda potensial antara keping diukur lagi. Dari pengukuran dapat ditunjukkan bahwa besarnya beda potensial antara dua keping berkurang dengan faktor κ terhadap beda potensial tanpa material dielektrik, $V = \frac{V_0}{\kappa}$ di mana $\kappa > 1$

Karena pada saat kapasitor dihubungkan dengan voltmeter tidak ada muatan yang mengalir baik dengan ataupun tanpa material dielektrik, maka muatan pada kapasitor tidak berubah, sehingga diperoleh

$$C = \frac{Q_0}{V} \text{ dan } C = \frac{Q_0}{\frac{V_0}{\kappa}} = \kappa C_0 \quad (5.47)$$

Untuk kapasitor keping sejajar yang luas penampangnya A , dipisahkan pada jarak d dan di antara keping diisi dengan zat dielektrik dengan konstanta κ , maka besarnya kapasitor adalah

$$C = \kappa \epsilon_0 \frac{A}{d} \quad (5.48)$$

Berdasarkan persamaan 5.45 dan 5.47 dapat ditunjukkan bahwa penambahan dielektrik pada kapasitor menaikkan nilai kapasitas, tetapi menurunkan beda potensial antara kedua keping dan muatannya konstan. Karena tidak ada energi yang masuk (hubungan ke baterai terputus) dan kapasitor melakukan kerja pada material dielektrik, maka secara keseluruhan energinya menurun,

$$U = \frac{U_0}{\kappa} \quad (5.49)$$



Gambar 5.29 Kapasitor dengan bahan dielektrik

Dengan kata lain, jika dielektrik disisipkan, baterai tetap terhubung dan beda potensial awal dipertahankan tetap konstan, maka baterai harus mensuplay banyak muatan sehingga kerja yang dilakukan juga besar. Dalam situasi seperti ini kita mengharapkan energi yang tersimpan naik, sehingga muatan pada pelat juga naik dengan faktor k , $q = kq_0$.

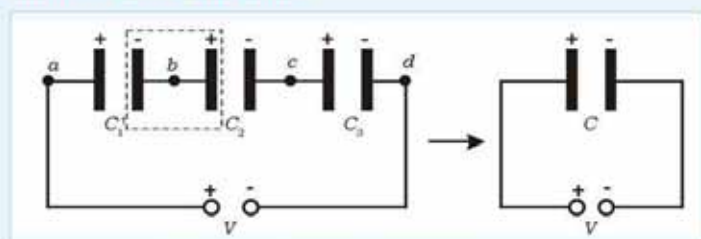
Oleh karena itu, secara umum bisa kita katakan bahwa dielektrik dapat menaikkan kapasitas dengan faktor k tidak memandang jenis dielektrik yang disisipkan. Untuk V konstan, energi yang tersimpan dapat dituliskan dalam bentuk persamaan,

$$U = \frac{1}{2} CV^2 = k\left(\frac{1}{2} C_0 V_0\right) = kU_0 \approx U_0$$

6. Susunan Kapasitor

Kapasitor dapat dihubungkan dengan dua cara, yaitu susunan seri dan paralel. Susunan seri bisa kalian lihat pada gambar 5.30 dan untuk kapasitor dengan susunan paralel dapat dilihat pada gambar 5.31.

a. Susunan Seri Kapasitor



Gambar 5.30 Susunan seri kapasitor

Satu prinsip yang harus kalian ingat pada kapasitor dengan susunan seri, besarnya muatan pada masing-masing kapasitor adalah sama dengan muatan pengganti. Penentuan besarnya kapasitor pengganti/gabungan dapat dijabarkan sebagai berikut,

$$V_{a-b} = \frac{q}{C_1}$$

$$V_{b-c} = \frac{q}{C_2}$$

$$V_{c-d} = \frac{q}{C_3}$$

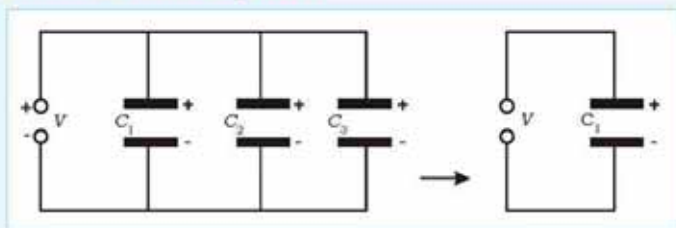
Beda potensial dari a ke d diperoleh:

$$\begin{aligned} V_{a-d} &= V_{a-b} + V_{b-c} + V_{c-d} \\ &= \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} \end{aligned}$$

Jika kapasitas pengganti untuk susunan seri, C_s , maka diperoleh ;

$$\begin{aligned} \frac{q}{C_s} &= \frac{q}{C_1} + \frac{q}{C_2} + \frac{q}{C_3} \\ \frac{1}{C_s} &= \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \end{aligned} \quad (5.50)$$

b. Susunan Paralel Kapasitor



Gambar 5. 31 Susunan paralel kapasitor

Jika beberapa kapasitor dihubungkan satu sama lain sedemikian rupa sehingga keping-keping yang bermuatan sama saling dihubungkan, maka susunan yang demikian disebut susunan paralel. Bagaimanakah hubungan antara tegangan masing-masing kapasitor dengan tegangan gabungan dalam susunan paralel? Untuk menjawab pertanyaan tersebut perhatikan gambar 5.31 di atas!

Pada kapasitor-kapasitor yang disusun paralel, besarnya tegangan (beda potensial) pada masing-masing kapasitor sama besarnya tegangan (beda potensial) gabungan.

Pada susunan paralel, tegangan (beda potensial) pada masing-masing kapasitor sama dengan tegangan sumber. Oleh karena itu besarnya kapasitas susunan paralel kapasitor dapat diturunkan sebagai berikut:

Besarnya muatan masing-masing kapasitor adalah:

$$Q_1 = C_1 V$$

$$Q_2 = C_2 V$$

$$Q_3 = C_3 V$$

Besarnya muatan total susunan paralel adalah:

$$\begin{aligned} Q &= Q_1 + Q_2 + Q_3 \\ &= C_1 V + C_2 V + C_3 V \end{aligned}$$

Jika kapasitas gabungan susunan kapasitor itu C_p , maka diperoleh:

$$C_p V = C_1 V + C_2 V + C_3 V$$

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 \quad (5.51)$$

Dari persamaan 5.51 dapat disimpulkan bahwa kapasitas susunan paralel (C_p) lebih besar daripada kapasitas masing-masing kapasitor.

7. Beda Potensial Listrik

Dalam pembicaraan medan listrik, kita tidak menunjukkan ketergantungan medan pada muatan uji, karena medan listrik didefinisikan sebagai gaya listrik per satuan muatan. Dengan mengetahui medan listrik, kita dapat menentukan gaya pada sembarang titik muatan yang ditempatkan pada suatu titik dalam medan tersebut. Beda potensial listrik, ΔV didefinisikan sebagai perubahan energi potensial listrik per satuan muatan uji positif. Besarnya beda potensial listrik yang merupakan energi potensial listrik per satuan muatan positif dinyatakan sebagai,

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q} = -\frac{W}{q} \quad (5.52)$$

di mana W adalah kerja yang dilakukan oleh gaya medan listrik pada partikel bermuatan tersebut dan besarnya sama dengan pengurangan energi potensial listrik. Untuk mengilustrasikan konsep ini, marilah kita hitung beda potensial untuk medan yang homogen antara dua plat:

$$\Delta V = \frac{\Delta U}{q_0} = \frac{q_0 E d}{q_0} = E d \quad (5.53)$$

Dapat dilihat pada persamaan 5.53 bahwa beda potensial hanya tergantung pada medan listrik antara dua plat dan jarak antara dua plat. Dapat dikatakan bahwa pada plat yang bermuatan positif mempunyai potensial yang lebih tinggi daripada plat yang bermuatan negatif dengan beda potensial sebesar ΔV .

Beda potensial listrik sangat bermanfaat secara fisis karena yang dapat diukur adalah beda potensial listrik, sedangkan potensial listrik tidak dapat diukur secara mutlak, hanya dapat diukur secara relatif yang harganya tergantung pada titik referensi yang dipilih. Beda potensial listrik antara dua titik adalah tetap dan mutlak. Misal, pada sepasang plat sejajar, plat bermuatan negatif dapat mempunyai potensial 0 V, 1100 V atau -200 V, jika plat yang bermuatan positif dari sistem plat sejajar mempunyai potensial listrik 100 V, 1200 V, atau -100 V, sehingga beda potensial antara kedua plat selalu 100 V.

Hal ini juga terjadi pada energi potensial gravitasi yang harganya tergantung pada titik referensi yang dipilih. Titik yang mempunyai energi potensial nol bisa titik di permukaan bumi, bisa juga di titik tak terhingga, yang jelas beda potensial energi antara dua titik adalah tetap.

Untuk mendefinisikan besarnya potensial listrik pada suatu titik, marilah kita misalkan jarak plat A dan B menjadi tak terhingga, maka energi potensial di titik tak terhingga adalah nol dan demikian juga potensial listriknya. Jadi, jika untuk pers 5.22, bila $U_A = 0$ dan juga $V_A = 0$ maka,

$$V_B = \frac{U_B}{q} = -\frac{W_{AB}}{q} \quad (5.54)$$

Persamaan 5.54 adalah definisi potensial listrik pada sembarang titik dalam medan listrik dimana W adalah kerja yang dilakukan oleh medan listrik pada partikel bermuatan yang bergerak dari tak terhingga ke titik B. Satuan potensial listrik sama dengan satuan beda potensial listrik, yaitu dalam volt (V) atau J/C.

Contoh Soal 5.13

Dua kapasitor 4 mF dan 7 mF disusun seri dan pada rangkaian ini diberi beda potensial 100 V. Hitunglah energi yang tersimpan dalam rangkaian ini.

Penyelesaian:

Kapasitas pengganti susunan seri dapat dihitung dengan persamaan 5.50, sehingga:

$$\begin{aligned}\frac{1}{C_s} &= \frac{1}{4\mu\text{F}} + \frac{1}{7\mu\text{F}} \\ &= \frac{7\mu\text{F} + 4\mu\text{F}}{28\mu\text{F}} \\ C_s &= \frac{28}{11}\mu\text{F}\end{aligned}$$

Energi yang tersimpan dalam rangkaian ini adalah $1.27 \times 10^{-2} \text{ J}$

Rangkuman

1. Hukum gaya - muatan dinyatakan: Bila ada dua buah muatan yang berinteraksi, muatan senama tolak-menolak, sedangkan muatan yang berbeda tarik-menarik.
2. Banyaknya muatan yang terkandung dalam suatu benda dapat dituliskan sebagai $q = n \cdot e$
3. Ada tiga cara pemuatan suatu benda, yaitu dengan gesekan, dengan cara kontak dan dengan cara induksi.
4. Besarnya gaya listrik yang terjadi antara dua benda bermuatan dinyatakan dalam $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$
5. Besarnya medan listrik yang dialami oleh muatan uji yang disebabkan oleh muatan Q yang bergerak r darinya dapat dinyatakan sebagai, $E = \frac{F}{q_0} = \frac{1}{q_0} \frac{kq_0 Q}{r^2} = \frac{kQ}{r^2} = \frac{F}{q_0}$
6. Resultan medan listrik yang dialami muatan uji yang disebabkan oleh beberapa muatan adalah $\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 + \vec{E}_3 + \dots$
7. Besarnya kuat medan listrik di permukaan konduktor berbentuk bola dinyatakan $E = \frac{kQ}{r^2} = 4\pi k\sigma$
8. Rapat muatan permukaan per satuan luas pada bola tersebut adalah, $\sigma = \frac{Q}{4\pi R^2}$

9. Besarnya fluks listrik sebanding dengan kuat medan dan luas permukaan yang dilewati oleh garis medan tersebut,

$$\text{dinyatakan } \phi = E.A = \frac{Q}{\Sigma \epsilon_0}$$

10. Besarnya potensial listrik dinyatakan dalam $V = k \frac{q}{r}$

11. Besarnya energi potensial listrik dinyatakan dalam

$$U = qV = k \frac{q_1 q_2}{r_{12}}$$

12. Besarnya potensial listrik di kulit bola dinyatakan, $V = k \frac{q}{R}$

13. Besarnya kapasitor keping sejajar dinyatakan dalam

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d}$$

14. Besarnya kapasitas kapasitor yang berbentuk silinder

$$\text{dinyatakan dalam } C = \frac{Q}{V} = \frac{Q}{\frac{2kQ}{\ell} \ln \frac{b}{a}} = \frac{\ell}{2k \ln \frac{b}{a}}$$

15. Besarnya kapasitas kapasitor bola dinyatakan dalam

$$C = \frac{Q}{V} = \frac{ab}{k(b-a)}$$

16. Energi yang tersimpan dalam kapasitor dinyatakan dalam $U = W = \frac{1}{2} qV = \frac{1}{2} CV^2$

17. Besarnya kapasitas kapasitor dengan dielektrik dinyatakan dalam $C = \kappa C_0$

18. Besarnya kapasitas kapasitor pengganti untuk beberapa kapasitor yang disusun seri dinyatakan,

$$\frac{1}{C_s} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} + \dots$$

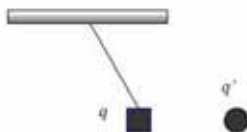
19. Besarnya kapasitas kapasitor pengganti untuk beberapa kapasitor yang disusun paralel dinyatakan,

$$C_p = C_1 + C_2 + C_3 + \dots$$

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

- Pernyataan yang benar mengenai gaya Coulomb adalah
 - gaya Coulomb berbanding lurus dengan jarak antarmuatan
 - gaya Coulomb berbanding terbalik dengan jarak antarmuatan
 - gaya Coulomb berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antarmuatan
 - gaya Coulomb berbanding terbalik dengan besar muatan
 - gaya Coulomb berbanding lurus dengan kuadrat masing-masing muatan

- Sebuah benda bermassa 50 gram dan bermuatan $q = + 0,6 \mu\text{C}$ digantungkan pada seutas tali ringan yang massanya dapat diabaikan. Tepat pada sebuah kanan benda pada jarak 10 cm diletakkan $q' = -1,2 \mu\text{C}$ yang menyebabkan posisinya seperti gambar di samping. Jika $k = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$ dan $g = 10 \text{ m/s}^2$, maka tegangan pada tali dekat pada nilai



- 0,20 N
 - 0,24 N
 - 0,30 N
 - 0,32 N
 - 0,35 N
- Dua buah partikel A dan B, masing-masing bermuatan listrik $+20 \mu\text{C}$ dan $45 \mu\text{C}$ terpisah pada jarak 15cm. Jika C adalah titik yang terletak di antara A dan B sedemikian hingga medan listrik di titik C adalah nol, maka letak titik C dari A adalah

- a. 2 cm
- b. 3 cm
- c. 4 cm
- d. 6 cm
- e. 9 cm

4. Sebuah elektron bergerak di antara dua keping sejajar dengan kelajuan 001c. Jarak antara dua keping tersebut adalah 5 mm. Besarnya medan listrik antara dua keping sejajar tersebut adalah . . .

- a. $5,12 \times 10^5$ V/m
- b. $5,12 \times 10^4$ V/m
- c. $5,12 \times 10^3$ V/m
- d. $5,12 \times 10^2$ V/m
- e. $5,12 \times 10^6$ V/m

5. Lihat gambar di samping! Besarnya potensial listrik di titik P adalah . . .

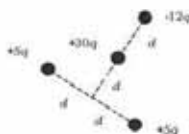
a. $\frac{kq}{4d}$

b. $\frac{3kq}{d}$

c. $\frac{4kq}{3d}$

d. $\frac{kq}{d}$

e. $\frac{24kq}{d}$



6. Segumpal awan mempunyai potensial $8 \cdot 10^6$ V terhadap bumi ketika terjadi kilat antara awan dan bumi, suatu muatan listrik sebesar 40 Coulomb dilepaskan. Banyaknya energi yang hilang pada peristiwa itu adalah . . .

- a. 5×10^{-6} J
- b. 5×10^5 J
- c. 5×10^6 J
- d. 5×10^8 J
- e. $3,2 \times 10^8$ J

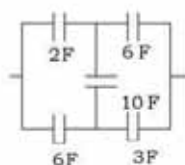
7. Kapasitor $C_1 = 1 \mu\text{F}$, $C_2 = 2 \mu\text{F}$ dan $C_3 = 3 \mu\text{F}$ dihubungkan seri dan diberi tegangan total sebesar E volt, maka
- Masing-masing kapasitor mempunyai tegangan listrik yang sama banyak
 - C_1 mengandung energi terbanyak
 - Pada C_3 bekerja tegangan yang kecil
 - C_1 , C_2 dan C_3 bersama-sama membentuk sebuah kapasitor ekuivalen sebesar $\frac{6}{11} \mu\text{C}$

Pernyataan yang benar adalah

- 1, 2, 3
 - 1, 3
 - 2, 4
 - 4 saja
 - 1, 2, 3, 4
8. Di bawah ini pernyataan yang benar dari hukum Gauss adalah
- pada bidang tertutup, jumlah garis gaya yang menembus keluar bidang tertutup sama dengan jumlah muatan yang masuk pada bidang itu
 - pada bidang Gauss, jumlah garis gaya yang menembus keluar bidang sama dengan jumlah muatan yang dilingkupi permukaan bidang itu
 - pada bidang Gauss jumlah garis gaya yang menembus bidang sama dengan jumlah muatan negatif yang terkandung dalam permukaan bidang dibagi E_0
 - pada bidang Gauss, jumlah garis gaya yang menembus bidang sama dengan jumlah muatan positif yang terkandung dalam permukaan bidang dibagi E_0
 - pada bidang Gauss, jumlah garis gaya yang keluar bidang sama dengan jumlah garis gaya yang menembus bidang itu
9. Kapasitor keping sejajar mula-mula berisi udara, kapasitannya = C_0 . Kemudian diisi bahan dielektrik dengan permitivitas relatif $\epsilon_{r1} = 2$, $\epsilon_{r2} = 3$ seperti gambar. Maka kapasitannya sekarang adalah

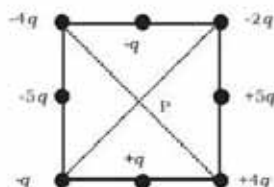


- a. C_0
 - b. $1,5 C_0$
 - c. $2 C_0$
 - d. $2,5 C_0$
 - e. $5 C_0$
10. Dari rangkaian kapasitor di atas, besar kapasitas totalnya adalah
- a. 2 F
 - b. 4 F
 - c. 6 F
 - d. 8 F
 - e. 12 F



B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

- Sebuah elektron mula-mula diam kemudian bergerak karena adanya beda potensial 2000 V. Jika massa elektron $9,11 \times 10^{-31}$ kg dan muatannya $-1,6 \times 10^{-19}$ C, maka hitung energi kinetik akhirnya!
- Sebuah muatan menghasilkan medan listrik di permukaan bumi. Partikel bermuatan -2×10^{-9} C bergerak setelah gaya sebesar 3×10^{-6} N diletakkan pada medan magnet tersebut.
 - a. Berapakah besarnya medan magnet tersebut?
 - b. Berapakah besar gaya listrik yang akan timbul apabila proton ditempatkan pada medan listrik tersebut?
 - c. Berapakah gaya gravitasi yang bekerja pada proton tersebut?
 - d. Berapakah perbandingan gaya listrik dan gaya gravitasi pada kasus di atas?
- Hitunglah besarnya potensial listrik di titik P pada gambar berikut!



4. Dua plat sejajar yang disisipi bahan dielektrik masing-masing memiliki luas 100 cm^2 dan diberi muatan sebesar $8,9 \times 10^{-7} \text{ C}$ yang berlawanan jenis. Medan listrik yang timbul di antara kedua keping tersebut adalah $1,4 \times 10^6 \text{ V/m}$. Hitunglah konstanta dielektriknya!
5. Dua buah kapasitor dengan kapasitas $2 \mu\text{F}$ dihubungkan secara paralel dengan sumber tegangan sebesar 300 V . Hitunglah energi total yang tersimpan dalam kapasitor!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab VI

Medan Magnet

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat menerapkan induksi magnetik dan gaya magnetik pada beberapa produk teknologi.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Arus
2. Medan magnet
3. Gaya magnet

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

1. Gaya magnetik
2. Sumber-sumber elektromagnetik
3. Fluks magnet
4. Hukum Gauss untuk medan magnet
5. Generalisasi Hukum ampere
6. Magnetisme dalam materi

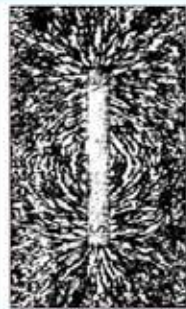
Ketika kalian belajar elektrostatik, kalian mengenal hukum Coulomb yang menyatakan bahwa muatan yang senama akan tolak menolak dan muatan yang berlainan akan tarik menarik. Kalian telah mempelajari kemagnetan pada waktu belajar di sekolah SMP bahkan waktu di SD bukan? Coba ingat lagi tentang jenis-jenis magnet, ada yang disebut tapal kuda, batang, jarum, U dll, bukan? Coba kalian ingat lagi setiap magnet selalu mempunyai dua kutub,

kutub utara dan selatan, bukan? Bila di antara kalian ada yang suka berpetualang, kalian pasti selalu membawa kompas? Coba jelaskan pada temanmu bagaimana cara bekerjanya kompas?

Pada waktu kalian belajar tentang kelistrikan, kalian mengetahui bahwa bila suatu benda dikatakan bermuatan maka benda tersebut hanya mempunyai muatan positif atau negatif saja. Sedangkan benda yang netral mempunyai muatan positif yang sama besar dengan muatan negatif. Bagaimana dengan magnet? Kalian tidak pernah mendengar magnet yang hanya mempunyai satu kutub saja bukan? Perbedaan yang jelas antara muatan listrik dan kutub magnet adalah bahwa benda dapat bermuatan listrik positif saja, negatif saja atau dapat bermuatan keduanya sehingga benda menjadi netral. Tetapi bila suatu benda mempunyai kutub magnet pasti benda tersebut mempunyai kutub utara (U) yang dianalogikan dengan kutub listrik positif dan kutub selatan (S) yang dianalogikan dengan kutub listrik negatif. Bila sebuah benda bersifat magnet, apabila dipotong-potong sampai sekecil apapun tetap bersifat magnet.

Konsep medan magnet hampir sama dengan konsep medan listrik. Medan listrik digambarkan dengan garis-garis gaya listrik dan merupakan besaran vektor. Medan listrik didefinisikan sebagai gaya persatuan muatan positif, sedangkan medan magnet yang timbul di sekitar sebuah magnet juga merupakan besaran vektor, yang dituliskan dengan simbol \vec{B} , juga terkait sangat erat dengan gaya magnet.

Pola garis medan magnet bisa ditunjukkan dengan mendemonstrasikan sebuah magnet yang ditutupi dengan selembar kertas dan di atas kertas ditaburi serbuk besi, lihat gambar 6.1



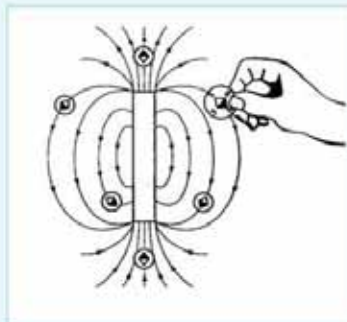
Sumber: College Physics, Jerry D. Wilson

Gambar 6.1 Garis medan magnet

Gambar 6.1 menunjukkan terjadinya pola pada serbuk besi yang tidak lain adalah pola garis gaya magnet antara dua kutub magnet yang didekatkan. Terbentuknya pola pada serbuk besi karena serbuk besi terinduksi oleh medan magnet sehingga menjadi magnet.

Untuk menggambarkan medan vektor, kita harus menentukan besar atau kekuatan dan arah medan dengan titik yang bervariasi. Arah medan magnet didefinisikan dari arah kutub utara ke kutub selatan magnet. Seperti pada percobaan Oersted dimana jarum kompas akan menyimpang kalau diletakkan di bawah aliran arus listrik. Penyimpangan ini disebabkan karena gaya magnetik pada dua kutub jarum yang berlawanan menyebabkan jarum berotasi dan berhenti pada arah yang sesuai dengan medan yang ada di lingkungan. Arah penyimpangan jarum kompas akan berlawanan jika arah arus listrik berganti arah.

Hal ini bisa kalian demonstrasikan dari sebuah magnet batang dan kalian bisa bermain dengan mendekatkan kompas di dekat magnet tersebut. Dengan menggerakkan posisi kompas akan kalian lihat pergerakan atau penyimpangan jarum kompas tersebut, lihat gambar 6.2.



Sumber: College Physics, Jerry D. Wilson

Gambar 6.2 Garis medan magnet

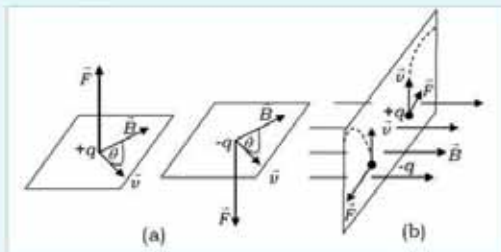
Dari gambar 6.2 dapat disimpulkan bahwa arah garis gaya keluar dari kutub utara ke kutub selatan. Dengan ini dapat dibuat suatu kesimpulan yang menarik bahwa medan magnet \vec{B} dianggap sebagai gaya magnet per satuan kutub (seperti pada medan listrik, gaya per satuan muatan).

A. Gaya Magnetik

Bila medan listrik didefinisikan sebagai besarnya gaya per satuan muatan positif yang dialami oleh muatan uji yang diletakkan di dalam medan listrik, sedangkan medan gravitasi adalah gaya gravitasi per satuan massa yang dialami oleh muatan uji, bagaimana dengan medan magnet?

Vektor medan magnet \vec{B} yang kadang-kadang juga disebut sebagai induksi magnet pada sebuah titik di dalam ruang tertentu didefinisikan sebagai gaya magnet yang dikerjakan pada benda tertentu yang diuji. Benda yang diuji bisa berupa sebuah muatan yang bergerak dengan kecepatan v . Dari percobaan tentang gerak beberapa partikel bermuatan di dalam medan magnet, menunjukkan bahwa

1. Gaya magnet sebanding dengan muatan dan kelajuan partikel yang bergerak.
2. Besar dan arah gaya magnet tergantung pada kecepatan partikel dan besar serta arah medan magnet.
3. Bila partikel bermuatan bergerak sejajar dengan arah vektor medan magnet, maka gaya magnetiknya nol.
4. Bila vektor kecepatan membentuk sudut θ dengan vektor medan magnet, maka gaya magnetik tegak lurus pada \vec{v} dan \vec{B} dan besarnya gaya magnet sebanding dengan $\sin\theta$, lihat gambar 6.3(a).
5. Gaya magnet yang bekerja pada muatan positif arahnya berlawanan dengan arah gaya magnet yang bekerja pada muatan negatif bila kedua muatan tersebut bergerak searah, lihat gambar 6.3(b).



Gambar 6.3 (a) Arah gaya magnet yang dialami partikel bermuatan positif dan negatif yang bergerak dalam medan magnet. (b) Partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet mengalami pembelokan

Dari uraian di atas, maka gaya magnet dapat dinyatakan secara matematik sebagai,

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B} \quad (6.1)$$

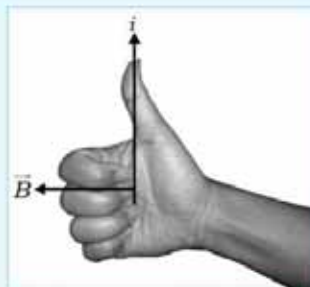
Persamaan 6.1 menunjukkan besarnya gaya magnet yang dikerjakan pada partikel bermuatan yang bergerak di dalam medan magnet.

Dan besarnya gaya magnet tersebut adalah

$$F = qvB \sin \theta \quad (6.2)$$

di mana $F = |\vec{F}|$, $v = |\vec{v}|$, $B = |\vec{B}|$

Arah gaya magnet juga tunduk pada aturan tangan kanan, yaitu bila empat jari tangan kanan diarahkan searah dengan \vec{v} muatan positif dan kemudian putarlah sampai menunjuk arah \vec{B} , maka ibu jari tangan kananmu akan menunjuk arah \vec{F} . Baik gaya listrik maupun gaya magnet keduanya bekerja pada partikel bermuatan, tetapi ada perbedaan yang mendasar antara keduanya, yaitu



Gambar 6.4 Aturan tangan kanan

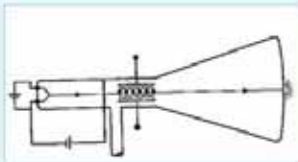
1. Arah gaya listrik searah dengan arah medan atau berlawanan dengan arah medan listrik, sedangkan arah gaya magnet selalu tegak lurus pada arah medan magnet.
2. Gaya listrik yang bekerja pada partikel tidak tergantung kecepatan partikel sedangkan gaya magnet hanya bekerja pada partikel yang bergerak.
3. Gaya listrik melakukan kerja pada partikel yang mengalami perpindahan sedangkan gaya magnet seragam tidak melakukan kerja pada partikel karena gaya magnet tegak lurus pada simpangan partikel sehingga kerjanya nol.

Satuan medan magnet dalam satuan SI adalah weber/m² yang juga disebut tesla (T). Satuan medan magnet juga dapat diturunkan dari persamaan 6.1 yaitu 1 T = 1 newton/(ampere.meter). Dalam prakteknya, satuan medan magnet yang digunakan dinyatakan dalam gauss yaitu 1 T = 10⁴ gauss.

Gaya magnetik sama dengan nol jika vektor kecepatan \vec{v} dan vektor medan \vec{B} adalah sejajar dan mempunyai nilai maksimum jika kedua vektor saling tegak lurus.

1. Penemuan Elektron

Baik medan listrik maupun medan magnet, keduanya mengerjakan gaya pada partikel bermuatan yang berada di dalamnya. Bila medan listrik dan medan magnet saling tegak lurus, kedua medan tersebut dikatakan sebagai medan silang. Sekarang marilah kita diskusikan sebuah partikel bermuatan yang bergerak melewati daerah yang dipengaruhi oleh medan listrik dan medan magnet yang saling tegak lurus. Dengan cara menggerakkan partikel bermuatan lewat kedua medan ini, elektron ditemukan oleh JJ Thompson sebagai hasil dari eksperimennya.



Gambar 6.5 Penemuan elektron

Gambar 6.5 menunjukkan perangkat alat yang digunakan Thompson untuk melakukan percobaannya yang terdiri dari : 1. tabung katoda, 2. filamen, 3. sumber tegangan, 4. sumber medan listrik \vec{E} dan medan magnet \vec{B} dan tabir fluorescent.

Prinsip kerja dari percobaan dengan perangkat alat di atas sebagai berikut

- Filamen dipanaskan dengan sumber arus searah sehingga menjadi cukup panas untuk melepaskan elektron dari filamen.
- Elektron bergerak dalam tabung vakum yang dipasang tegangan dengan beda potensial V untuk mempercepat gerak elektron.
- Elektron bergerak melewati medan magnet dan medan listrik sehingga elektron dapat bergerak lurus atau berbelok disesuaikan dengan kondisi yang diinginkan. Pada gambar ditunjukkan bahwa medan listrik \vec{E} arahnya ke atas dan medan magnet \vec{B} arahnya menembus buku
- Elektron bergerak lurus maka pengaruh medan listrik dan medan magnet saling mengabaikan atau kedua medan di set sama dengan nol, $\vec{E} = 0$ dan $\vec{B} = 0$.
- Elektron bergerak ke atas karena dipengaruhi oleh medan listrik, sebab gaya listrik pada partikel bermuatan negatif berlawanan dengan arah medan listrik. Untuk partikel bermuatan negatif, besar gaya yang dialaminya $F = qE = ma$, a_y adalah percepatan partikel setelah melewati medan listrik sepanjang L , arah a_y ke atas. Partikel bergerak mendatar dengan kecepatan v pada saat partikel bergerak masuk ke

medan listrik, maka waktu yang diperlukan untuk melintasi medan listrik \vec{E} adalah $t = \frac{L}{v}$. Maka besarnya simpangan partikel arah ke atas adalah

$$y = \frac{1}{2} a_y t^2 = \frac{qEL^2}{2mv^2} \quad (6.3)$$

- f. Elektron bergerak ke bawah dipengaruhi oleh gaya magnet yang menggunakan aturan tangan kanan pada partikel bermuatan negatif.

Karena medan magnet arahnya menembus buku dan partikel bermuatan negatif bergerak ke kanan maka gaya magnet pada partikel tersebut arahnya kebawah, partikel negatif juga bergerak kebawah. Karena arah kecepatan partikel dan medan magnet saling tegak lurus, maka besarnya gaya magnet yang dialami partikel adalah $F = qvB$.

Bila medan listrik dan medan magnet tidak diset sama dengan nol tetapi pengaruh kedua medan tersebut dibuat sama sehingga partikel bergerak lurus, maka besarnya simpangan ke atas sama dengan ke bawah. Besarnya medan listrik dan medan magnet juga

sama sehingga diperoleh $v = \frac{E}{B}$. Harga kecepatan ini dimasukkan ke persamaan 6.3 maka diperoleh

$$\frac{m}{q} = \frac{B^2 L^2}{2yE} \quad (6.4)$$

di mana $\frac{m}{q}$ adalah rasio antara massa dan muatan pada sebuah partikel, dan semua besaran pada ruas kanan dapat diukur. Dapat disimpulkan dari percobaan bahwa semua materi mempunyai muatan.

2. Gerak Partikel dalam Medan Magnet

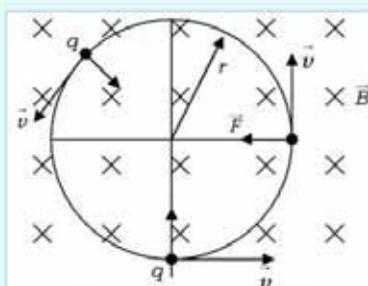
Bila sebuah partikel bergerak dalam lintasan berbentuk lingkaran dengan kelajuan konstan, maka partikel tersebut akan mengalami gaya sentripetal yang selalu menuju ke pusat lingkaran dan arahnya selalu tegak lurus pada arah kecepatan liniernya.

Ketika elektron ditembakkan dalam medan magnet homogen maka arah kecepatan elektron tersebut akan tegak lurus dengan arah medan magnet. Karena arah \vec{v} selalu tegak lurus arah \vec{B} ,

maka arah \vec{F} yang dialami partikel tersebut selalu tegak lurus pada arah \vec{v} sehingga partikel bergerak melingkar dan besarnya gaya sentripetal sama dengan besarnya gaya magnetik, yaitu $F_r = m \frac{v^2}{r}$, $F_B = qvB$,

$F_r = F_B$, maka diperoleh

$$r = \frac{mv}{qB} \quad (6.5)$$



Gambar 6.6 Partikel bermuatan q bergerak dengan kecepatan v di dalam medan magnet homogen B dimana arah v selalu tegak lurus arah B

Contoh Soal 6.1

Sebuah partikel bermuatan negatif sebesar -5×10^{-4} C bergerak dengan kelajuan 100 m/s searah dengan sumbu x positif menuju medan magnet yang seragam sebesar 2 tesla yang searah dengan sumbu y positif,

- Tentukan besarnya gaya magnet yang dialami partikel tersebut!
- Bagaimanakah lintasan partikel yang bermuatan negatif dalam medan magnet tersebut!

Penyelesaian:

Karena arah kecepatan dan medan magnet saling tegak lurus, maka diharapkan bahwa lintasan partikel berbentuk lingkaran. Dari soal di atas diketahui: $q = -5 \times 10^{-4}$ C, $v = 100$ m/s, $B = 2$ T

Ditanya:

- Gaya magnet yang dialami partikel?
Besarnya F dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan $F = qvB \sin \theta = 0,1$ N dan arah F searah dengan sumbu z negatif karena muatan yang bergerak di dalam medan magnet adalah muatan negatif.
- Lintasan partikel yang bermuatan negatif berbentuk lingkaran maka partikel mengalami gaya sentripetal yang besarnya sama dengan gaya magnet yaitu $m \frac{v^2}{R} = qvB$

$$R = \frac{mv}{qB} = \frac{(m)(100 \text{ m/s})}{(5 \times 10^{-4} \text{ C})(2 \text{ T})}$$

di mana m adalah massa partikel bermuatan yang bergerak dalam medan magnet. (gambar 6.6)

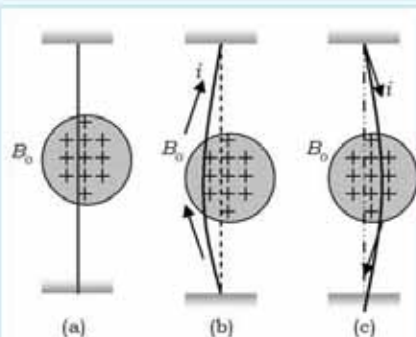
Tugas 6.1

Dari persamaan 6.5 tentukan besarnya periode, frekuensi dan frekuensi angular dari partikel yang bergerak melingkar dalam medan magnet B !

3. Gaya Magnet pada Kawat Penghantar Berarus

Pada bab sebelumnya kalian sudah mempelajari bahwa bila sebuah partikel bermuatan bergerak dalam medan magnet, partikel tersebut mengalami gaya magnet. Kira-kira apa yang akan terjadi bila kawat penghantar yang dialiri arus diletakkan dalam medan magnet? Apakah ada perbedaan antara muatan yang bergerak dengan arus yang mengalir? Ada berapa banyak muatan yang terdapat pada arus yang mengalir?

Pertanyaan di atas akan kalian jawab dengan mudah sebab kalian semua sudah tahu bahwa arus adalah muatan yang mengalir per satuan waktu, maka arus terdiri dari sekumpulan partikel bermuatan. Untuk menyelidiki gaya magnet yang dialami oleh kawat berarus, coba dekatkan kawat yang berarus dengan medan magnet dan amati apa yang terjadi pada kawat berarus? Coba bandingkan bila yang didekatkan adalah kawat yang tak berarus! Bandingkan pengamatan kalian dengan gambar 6.7



Gambar 6.7 Kawat penghantar yang direntangkan dekat medan magnet (a) $i=0$, (b) i mengalir ke atas, (c) i mengalir ke bawah

Gambar 6.7(a) menunjukkan bahwa kawat yang diletakkan dalam medan listrik tidak berarus, ternyata kawat tidak berubah yang berarti kawat tidak mengalami gaya magnet. Pada gambar 6.7(b) dan (c) kawat penghantar yang berarus mengalami penyimpangan karena pada kawat bekerja gaya magnet. Pada kawat yang dialiri arus ke atas (arah arus pada bidang kertas yang arahnya ke atas) yang diletakkan dalam medan magnet yang arahnya menjauhi kita, maka gaya magnet yang dikerjakan pada kawat arahnya ke kiri, sehingga kawat disimpangkan ke kiri. Bila kawat dialiri arus yang arahnya ke bawah diletakkan dalam medan magnet maka kawat tersebut akan menyimpang ke kanan.

Untuk menentukan besarnya gaya magnet yang dikerjakan pada kawat, kita misalkan muatan yang mengalir per satuan volume adalah n , maka jumlah total muatan yang terkandung dalam kawat yang panjangnya ℓ dan luas penampangnya A adalah $n \ell A$. Kecepatan muatan yang mengalir adalah kecepatan hanyut v_d , maka besarnya gaya magnet total yang dikerjakan pada seluruh kawat yang panjangnya ℓ adalah $\vec{F} = (q\vec{v}_d \times \vec{B}) nA\ell$. Karena $I = nqAv_d$ maka gaya yang dikerjakan pada kawat berarus adalah

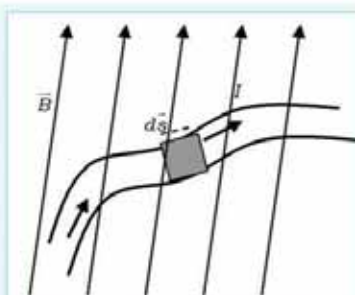
$$\vec{F} = I\vec{\ell} \times \vec{B} \quad (6.6)$$

Di mana $\vec{\ell}$ adalah vektor panjang yang arahnya searah dengan arah aliran arus. Persamaan 6.6 hanya berlaku untuk kawat penghantar lurus yang panjangnya ℓ dan dialiri dialiri arus I yang diletakkan dalam medan magnet yang seragam. Untuk kawat penghantar yang bentuknya sembarang, lihat gambar gambar 6.8 persamaan 6.6 dapat dituliskan menjadi

$$d\vec{F} = I d\vec{s} \times \vec{B} \quad (6.7)$$

di mana $d\vec{F}$ adalah gaya yang bekerja pada elemen yang panjangnya $d\vec{s}$ yang dialiri arus I . Gaya total yang dikerjakan pada kawat sembarang dapat diperoleh dengan mengintegrasikan persamaan 6.7 sebagai

$$\vec{F} = I \int_A d\vec{s} \times \vec{B} \quad (6.8)$$



Gambar 6.8 Kawat bentuk sembarang yang harus diletakkan pada medan magnet luar

Karena arah $d\vec{s}$ dan \vec{B} pada gambar 6.8 terletak pada bidang kertas maka arah \vec{F} tegak lurus pada kertas arah keluar dari kertas.

4. Gaya Magnet antara Dua Penghantar yang Dialiri Arus Listrik

Dua buah penghantar yang sejajar, masing-masing dialiri arus I_1 dan I_2 yang searah. Dua penghantar tersebut terpisah pada jarak a , lihat gambar 6.15. Besarnya medan magnet pada semua titik yang berjarak a dari Penghantar 2 dapat diperoleh dari persamaan 6.18 sebagai

$$B_2 = \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} \text{ dan arahnya tegak lurus pada bidang yang melewati}$$

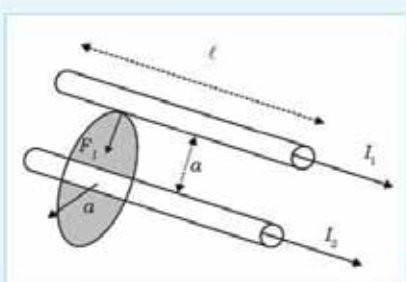
kedua penghantar tersebut yaitu keluar dari kertas. Besarnya gaya magnet yang dialami oleh kawat berarus yang diletakkan dalam medan magnet menurut pers adalah $\vec{F} = I\vec{\ell} \times \vec{B}$, maka besarnya gaya yang dialami oleh sebuah titik yang terletak pada penghantar 1 adalah

$$F = I_1 \ell \frac{\mu_0 I_2}{2\pi a} = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\pi a} \quad (6.8a)$$

Arah gaya \vec{F} antara dua kawat berarus tersebut dari penghantar 1 menuju penghantar 2, jadi dapat dikatakan bahwa kedua kawat yang dialiri arus searah akan saling tarik-menarik dan besarnya gaya tarik-menarik ditunjukkan pada persamaan 6.8a. Besarnya gaya tarik menarik per satuan panjang dapat dituliskan sebagai

$$\frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi a} \quad (6.8a)$$

Bila arah arus yang mengalir pada dua buah penghantar berlawanan arah, maka antara dua penghantar tersebut saling tolak menolak.



Gambar 6. 9 Dua buah penghantar sejajar yang panjangnya ℓ dan jarak keduanya a dialiri arus I_1 dan I_2

Kegiatan 6.1

Tujuan:

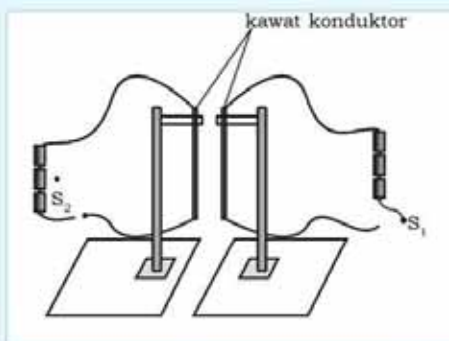
Mengamati adanya gaya tarik-menarik/tolak-menolak pada dua kawat sejajar yang dialiri arus listrik.

Alat dan bahan:

1. Konduktor/kawat yang panjangnya 20 cm
2. Sumber arus searah baterai 6 buah
3. Statif
4. Saklar

Prosedur:

1. Susun alat seperti gambar di bawah!



2. Tutup S_1 dan S_2 sehingga kedua konduktor dialiri arus
3. Amati apa yang terjadi dengan kedua kawat konduktor tersebut? Bagaimanakah posisi dan bentuk kawat konduktor?
4. Lakukan kegiatan 1, 2, 3 tetapi dengan mengubah arah arus dengan cara membalik posisi baterai!
5. Bagaimanakah kondisi kawat konduktor?

Kesimpulan:

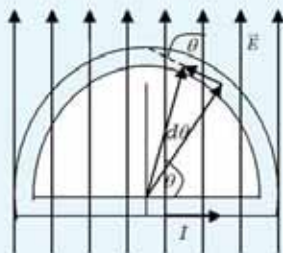
Tulislah kesimpulan yang kalian dapatkan dari kegiatan di atas!

Contoh Soal 6.2

Sebuah kawat berarus I dibengkokkan sehingga membentuk setengah lingkaran dengan jari-jari R dan diletakkan dalam medan magnet homogen yang searah sumbu y . Tentukan besarnya gaya magnet pada bagian kawat yang lurus dan pada bagian lengkung!

Penyelesaian:

Besarnya gaya pada kawat berarus ditentukan dengan menggunakan persamaan 6.8 dan berdasarkan gambar 6.8. Untuk bagian kawat yang lurus, arah $d\vec{s}$ tegak lurus pada arah medan magnet \vec{B} , besarnya gaya pada kawat lurus ditentukan dengan persamaan 6.6, dimana $\ell = 2R$ sehingga diperoleh sebagai $F = 2IRB$



Untuk bagian kawat yang lengkung besarnya $d\vec{s} \times \vec{B}$ adalah $d\vec{s} \sin B$, besarnya $d\vec{s} = R d\theta$ maka persamaan 6.8 dapat ditulis menjadi

$$\begin{aligned}\vec{F} &= I \int_0^\pi ds \sin \theta B = IRB \int_0^\pi \sin \theta d\theta = IRB (-\cos \theta)_0^\pi \\ &= IRB (\cos 0^\circ - \cos \pi) = 2IRB.\end{aligned}$$

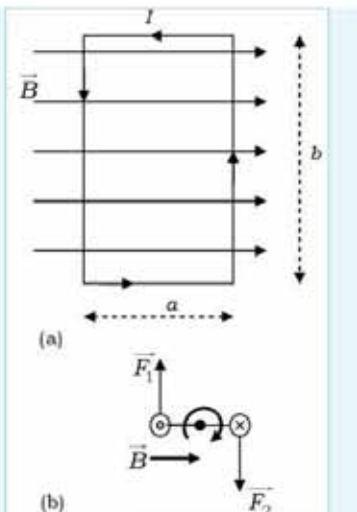
B. Torsi pada Loop Berarus dalam Medan Magnet

Pada bab sebelumnya kita telah mempelajari gaya yang dialami oleh penghantar yang berarus yang diletakkan di dalam medan magnet luar homogen. Apa yang terjadi pada loop penghantar yang berarus bila loop tersebut diletakkan di dalam medan magnet luar yang homogen? Untuk mengetahui pengaruh medan magnet pada loop yang berarus, marilah kita letakkan sebuah loop berbentuk persegi panjang yang dialiri arus I di dalam medan magnet di mana

arah medannya sebidang dengan loop, lihat gambar 6.10(a)

Besarnya gaya magnet yang dialami oleh masing-masing sisi persegi panjang dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan 6.6 sebagai berikut:

Untuk sisi a , arah medan magnet searah dengan arah arus dan berlawanan dengan arah arus, maka besarnya gaya magnet pada sepasang sisi yang sejajar tersebut nol. Sedangkan untuk sisi b , arah arus tegak lurus pada arah medan magnet, maka besarnya gaya magnet pada kedua sisi b adalah sama besar, $F_b = IbB$, yang sebelah kiri arahnya ke luar kertas, sedangkan pada sisi yang sebelah kanan arahnya masuk ke kertas. Bila kalian melihat loop dari bagian ujung akhir, maka kedua gaya akan terlihat seperti pada gambar 6.10(b).



Gambar 6.10 Loop persegi panjang berarus I diletakkan pada medan magnet yang sebidang dengan bidang loop

Karena gaya yang bekerja pada kedua sisi sama besar dan arahnya berlawanan maka kedua gaya ini akan menghasilkan torsi terhadap titik O (loop berotasi terhadap sumbu yang lewat titik tengah ke dua sisi a yang menyebabkan loop berotasi searah jarum jam dan besarnya torsi tersebut adalah

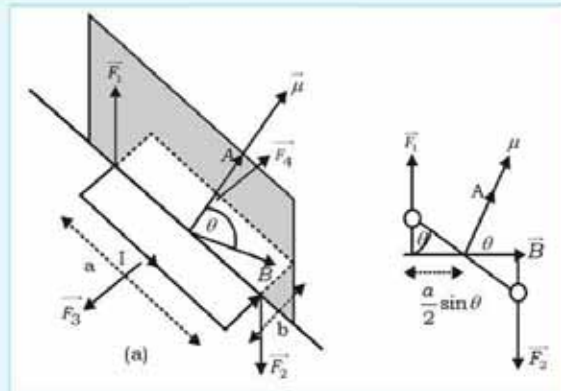
$$\tau = F_1 \frac{a}{2} + F_2 \frac{a}{2} = (IbB) \frac{a}{2} + (IbB) \frac{a}{2} = IabB = IAB \quad (6.9)$$

di mana $A = ab$ yaitu luas loop yang dialiri arus I . Persamaan 6.9 hanya berlaku untuk medan magnet yang sebidang dengan loop dan arahnya tegak lurus pada sisi b . Bila medan magnet tetap sebidang dengan loop tetapi membentuk sudut θ terhadap sisi b , maka besarnya torsi yang dikerjakan pada loop sama dengan hasil kali antara persamaan 6.9 dengan $\sin \theta$, yaitu $\tau = IAB \sin \theta$

Bila medan magnet tidak sebidang dengan loop, tetapi arah medan magnet membentuk sudut θ dengan normal bidang loop tetapi tegak lurus pada sisi b , lihat gambar 6.11. Pada gambar 6.11(a)

ditunjukkan bahwa gaya yang bekerja pada sisi a terletak pada garis kerja yang sama maka saling mengabaikan. Sedangkan gaya magnet yang bekerja pada sisi b , seperti yang ditunjukkan pada gambar 6.1(b), maka besarnya torsi yang dilakukan oleh sepasang gaya pada sisi b ini adalah

$$\begin{aligned}\tau &= F_1 \frac{a}{2} \sin \theta + F_2 \frac{a}{2} \sin \theta = (IbB) \frac{a}{2} \sin \theta + (IbB) \frac{a}{2} \sin \theta \\ &= IAB \sin \theta\end{aligned}\quad (6.10)$$



Gambar 6.11 Arah medan magnet membentuk sudut θ dengan garis normal bidang loop

di mana $A = ab$ adalah luas loop. Pada persamaan (6.10) ditunjukkan bahwa harga maksimum torsi adalah IAB bila medan listrik sejajar dengan loop dan nol bila medan magnet tegak lurus pada loop. Maka secara umum, torsi adalah vektor yang arahnya tegak lurus pada vektor \vec{A} yang tegak lurus pada bidang loop dan vektor medan magnet \vec{B} . Berdasarkan hal di atas, maka secara vektor persamaan 6.10 dapat dituliskan menjadi

$$\vec{\tau} = I\vec{A} \times \vec{B} \quad (6.11)$$

Vektor \vec{A} besarnya sama dengan luas loop. Bila $I\vec{A}$ didefinisikan sebagai momen magnetik dari loop, $I\vec{A} = \vec{\mu}$, maka persamaan 6.11 dapat dituliskan menjadi

$$\vec{\tau} = \vec{\mu} \times \vec{B} \quad (6.12)$$

Satuan besaran $\vec{\tau}$ dalam satuan SI adalah A.m^2 .

Bila loop yang berarus terdiri dari N loop maka besarnya torsi yang dihasilkan oleh N loop tersebut adalah

$$\vec{\tau} = N\vec{IA} \times \vec{B} = \vec{\tau} = \vec{\mu}_{\text{total}} \times \vec{B} \quad (6.13)$$

di mana $\mu_{\text{total}} = NIA$

Tugas 6.2

Bandingkan antara momen dipol pada medan listrik dan momen magnetik pada medan magnet!

Contoh Soal 6.3

Sebuah kumparan berbentuk persegi panjang dengan ukuran $5 \text{ cm} \times 8 \text{ cm}$, terdiri dari 20 lilitan (loop terdiri dari 20 loop) dan pada kumparan mengalir arus sebesar 20 mA, (a) Tentukan besarnya momen magnetik pada kumparan. (b) Bila kumparan tersebut diletakkan dalam medan magnet dengan kuat medan magnet $B = 0,4 \text{ T}$ dan sejajar dengan loop, tentukan besarnya torsi yang dilakukan gaya magnet pada loop!

Penyelesaian:

Dari soal di atas dapat diketahui

$$A = (5 \times 8) \text{ cm}^2 = 40 \text{ cm}^2 = 0,4 \times 10^{-2} \text{ m}^2, N = 20, I = 20 \times 10^{-3} \text{ A}, \theta = 90^\circ \text{ dan besarnya } B = 0,4 \text{ T}$$

Ditanya: μ dan τ ?

Jawab:

$$\mu = NIA = 20 \times 0,4 \times 10^{-2} \text{ m}^2 \times 20 \times 10^{-3} \text{ A} = 1,6 \times 10^{-3} \text{ A.m}^2 \text{ dan } \tau = \mu B = 0,64 \times 10^{-3} \text{ N.m}$$

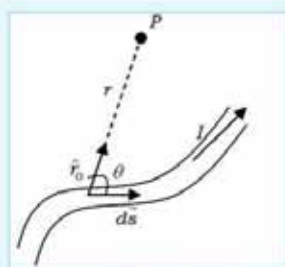
C. Sumber-sumber Elektromagnetik

Pada bab sebelumnya kalian telah mempelajari gaya yang dialami oleh partikel bermuatan yang bergerak di dalam medan magnet, maka sekarang kalian akan mempelajari darimana asal medan magnet? Dalam mempelajari dari mana asalnya

medan magnet, Biot-Savart telah menunjukkan bahwa medan magnet ditimbulkan oleh partikel bermuatan yang bergerak. Dengan menggunakan basis medan magnet yang ditimbulkan oleh partikel bermuatan yang bergerak, kita akan memahami mengapa beberapa material bersifat magnet. Pertama-tama kita akan berdiskusi tentang medan magnet yang ditimbulkan oleh kawat berarus yang dirumuskan oleh Biot-Savart secara eksperimen.

1. Hukum Biot Savart

Setelah Oersted menemukan jarum kompas disimpangkan oleh konduktor yang berarus, Biot dan Savart juga melaporkan bahwa sebuah penghantar berarus juga menimbulkan gaya pada sebuah magnet. Dari percobaannya Biot-Savart menunjukkan hubungan antara medan magnet pada suatu titik dengan kuat arus pada penghantar yang menimbulkan medan magnet tersebut. Kemudian hasil percobaan Biot-Savart tentang medan magnet yang ditimbulkan kawat berarus, lihat gambar 6.12,



Gambar 6.12 Kawat berarus I yang menimbulkan medan magnet di titik P

dapat disimpulkan bahwa medan magnet $d\vec{B}$ di titik P yang disebabkan oleh arus I yang mengalir pada kawat sepanjang $d\vec{s}$ dan berjarak r dari $d\vec{s}$ adalah

1. vektor $d\vec{B}$ tegak lurus pada $d\vec{s}$ dan pada vektor satuan \vec{r}_0 dimana r adalah garis hubung antara $d\vec{s}$ dengan titik P .
2. Besarnya $d\vec{B}$ berbanding terbalik dengan r^2 yang merupakan jarak dari $d\vec{s}$ ke titik P .
3. Besarnya $d\vec{B}$ sebanding dengan kuat arus I , $d\vec{s}$ dan $\sin\theta$.

Maka secara matematik hukum Biot-Savart dapat dituliskan sebagai

$$d\vec{B} = k_m \frac{I d\vec{s} \times \vec{r}_0}{r^2} \quad (6.14)$$

di mana k_m adalah konstanta yang dalam satuan SI besarnya 10^{-7} weber/ampere dan biasanya konstanta k_m dituliskan sebagai

$$k_m = \frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7} \text{ Wb/A} \quad (6.15)$$

di mana μ_0 adalah permeabilitas dalam ruang hampa.

2. Medan Magnet pada Kawat Lurus Berarus Listrik

Medan magnet pada sebuah titik yang ditimbulkan oleh elemen kawat yang panjangnya ℓ yang dialiri arus I dapat diperoleh dari persamaan 6.14 sebagai

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{d\vec{s} \times \vec{r}_0}{r^2} \quad (6.16)$$

dan integral diambil untuk seluruh panjang penghantar.

Berikut ini akan kita bahas medan magnet yang ditimbulkan oleh kawat tipis yang lurus yang dialiri arus I yang searah sumbu x . Besarnya medan magnet di titik P dapat ditentukan dengan persamaan 6.12. Dari gambar 6.13 dapat diperoleh besarnya $d\vec{s} \times \vec{r}_0 = ds \sin \theta$, tetapi karena ds searah dengan sumbu x maka $ds = dx$, dan arahnya tegak lurus keluar dari bidang kertas, misalnya kita beri simbol \hat{k} . Maka persamaan 6.14 dapat ditulis menjadi

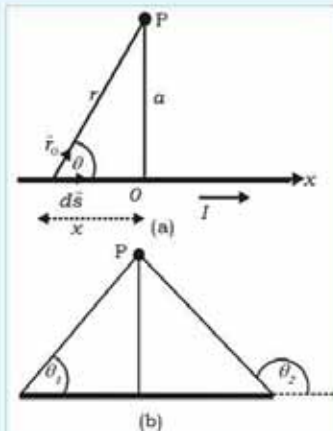
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I dx \sin \theta}{4\pi r^2}, \quad r = \frac{a}{\sin \theta}, \quad \text{dan}$$

karena $x = -a \cot \theta$ maka diperoleh $dx = a \frac{\cos \theta}{\sin^2 \theta} d\theta$. Bila variabel-variabel ini disubstitusikan ke persamaan 6.12 diperoleh

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \frac{a \sin \theta d\theta}{\frac{a^2}{\sin^2 \theta}} = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin \theta d\theta$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad (6.17)$$

Persamaan 6.17 menunjukkan besarnya medan magnet di titik P yang berjarak a dari kawat penghantar lurus yang dialiri arus I di mana θ_1 adalah sudut yang dibuat oleh garis hubung antara ujung kiri penghantar dengan titik P dengan arah x dan θ_2 adalah



Gambar 6.13 Medan listrik di titik P yang ditimbulkan oleh kawat berarus I yang panjangnya ℓ

sudut yang dibuat oleh garis hubung antara ujung kanan penghantar dengan titik P dengan arah x . Untuk penghantar yang panjangnya tak terhingga dan P terletak pada sumbu penghantar dan berjarak a dari penghantar, maka θ_1 mendekati nol dan θ_2 mendekati 180° , sehingga persamaan 6.17 menjadi

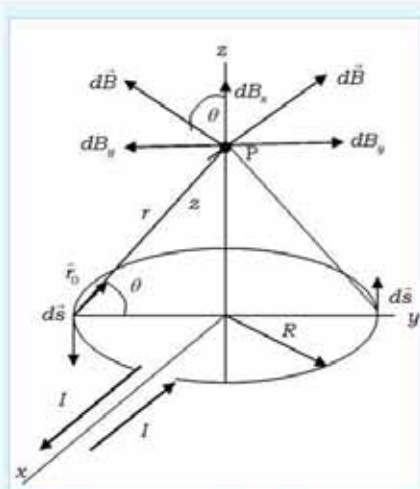
$$B_z = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (1 - (-1)) = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad (6.18)$$

3. Medan Magnet di titik yang Terletak pada Sumbu Penghantar Melingkar yang Dialiri Arus I

Bila kawat berarus yang panjangnya ℓ dibentuk menjadi lingkaran, lihat gambar 6.14 maka kita dapat menghitung besarnya medan magnet pada sembarang titik yang terletak pada sumbu lingkaran tersebut. Bila kawat melingkar diletakkan pada bidang $x-y$, maka sumbu lingkaran (garis yang melalui pusat lingkaran dan tegak lurus pada bidang lingkaran) akan searah dengan sumbu z , dan r selalu tegak lurus pada elemen busur $d\vec{s}$ sehingga besarnya $d\vec{s} \times \vec{r}_0 = d\vec{s}$. Dari gambar 6.14 juga ditunjukkan bahwa $r^2 = R^2 + z^2$. Dengan demikian persamaan

6.15 dapat dituliskan menjadi
$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I ds}{R^2 + z^2}$$

Kalau kita ambil elemen $d\vec{s}$ pada bagian lingkaran sebelah kanan maka komponen dB_y akan saling menghilangkan dengan komponen dB_y yang dihasilkan dari elemen $d\vec{s}$ pada lingkaran sebelah kiri. Maka untuk seluruh lingkaran, komponen dB_y yang dihasilkan oleh elemen $d\vec{s}$ yang simetri terhadap sumbu lingkaran saling menghilangkan. Sehingga kita hanya memperoleh medan



Gambar 6.14 Medan magnet di titik P yang terletak pada sumbu kawat melingkar yang berarus I

magnet di titik P dari komponen dB_x saja. Maka besarnya medan magnet di titik P yang terletak pada sumbu lingkaran dan berjarak

z dari pusat lingkaran adalah $B = \int 2dB_x = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int \frac{ds \cos \theta}{z^2 + R^2}$ karena $\cos \theta = \frac{R}{\sqrt{z^2 + R^2}}$ dan $\int ds = 2\pi R$

Sehingga diperoleh,

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2(z^2 + R^2)^{3/2}} \quad (6.19)$$

Persamaan 6.19 menunjukkan besarnya medan magnet di titik P yang berjarak z dari pusat kawat melingkar yang berjari-jari R dan dialiri arus sebesar I . Bila titik P terletak di pusat kawat yang melingkar, maka $z = 0$ sehingga persamaan 6.19 menjadi

$$B = \frac{\mu_0 I}{2R} \quad (6.20)$$

Bila titik P terletak pada sumbu lingkaran di mana $z \gg R$, maka persamaan 6.19 menjadi

$$B = \frac{\mu_0 IR^2}{2z^3} \quad (6.21)$$

Persamaan 6.21 mempunyai bentuk persamaan yang sama dengan medan listrik pada sebuah titik yang jaraknya di tak terhingga yang ditimbulkan oleh dipol listrik.

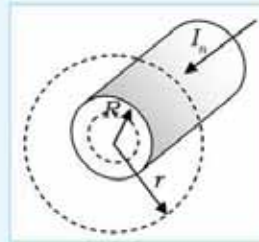
4. Hukum Ampere

Bentuk hukum Ampere hampir sama dengan hukum Gauss. Pernyataan dari hukum Ampere adalah: integral garis dari $\vec{B} \cdot d\vec{s}$ di sekitar lintasan tertutup sama dengan $\mu_0 I$ di mana I adalah arus yang mengalir pada loop tertutup dan besarnya konstan. Secara matematik dapat ditulis menjadi

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I \quad (6.22)$$

di mana $d\vec{s}$ adalah panjang lintasan tertutup yang bisa dikatakan sebagai lintasan Ampere. Hukum Ampere hanya berlaku untuk I konstan dan hanya bermanfaat untuk penghantar yang simetri.

Dengan menggunakan hukum Ampere kita dapat menentukan besarnya medan magnet yang sudah kita hitung sebelumnya dengan hukum Biot-Savart. Misalnya besarnya medan magnet disekitar kawat lurus dan panjang yang dialiri arus yang konstan sebesar I_0 , lihat gambar 6.16. Dengan menggunakan gambar 6.16, besarnya medan magnet di titik yang berjarak r dari kawat silinder yang jari-jarinya R yang dialiri arus konstan sebesar I_0 dapat ditentukan dengan



Gambar 6.15 Medan magnet disekitar kawat berarus ditentukan dengan hukum Ampere. Lingkaran garis putus bias disebut lintasan Ampere

persamaan 6.22 sebagai $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I \rightarrow B \oint ds = \mu_0 I_0$ atau $B(2\pi) = \mu_0 I_0$

$$B = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi} \text{ untuk } r > R \quad (6.23)$$

Sedangkan untuk $r < R$ maka I yang mengalir dalam kawat silinder yang jari-jarinya r atau lebih kecil dapat ditentukan bila arus yang mengalir persatuan luas adalah homogen sepanjang kawat. Bila J , kuat arus persatuan luas penampang kawat, maka

$J = \frac{I_0}{A} = \frac{I_0}{\pi R^2}$, dan besarnya arus yang mengalir pada kawat yang

jari-jarinya r adalah $I' = A'J = \pi r^2 \frac{I_0}{\pi R^2} = I_0 \frac{r^2}{R^2}$. Besarnya medan

magnet di dalam kawat silinder berarus I' dapat diperoleh dari

persamaan 6.22 adalah $B(2\pi r) = \mu_0 I_0 \frac{r^2}{R^2}$ atau

$$B = \frac{\mu_0 I_0}{2\pi R^2} r \text{ untuk } r < R \quad (6.24)$$

Persamaan, 6.24 adalah besarnya medan magnet di dalam kawat yang dialiri arus homogen yang jaraknya r dari sumbu kawat.

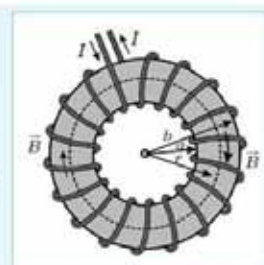
Tugas 6.3

1. Bila di dalam kawat homogen tersebut elektronnya bergerak dengan kecepatan hanyut v_d dan jaraknya $r < R$ dari sumbu kawat, tunjukkan bahwa elektron tersebut bergerak harmonik secara radial!
2. Gambarlah grafik besarnya (kuat) medan magnet sebagai fungsi posisi dari $r = 0$ sampai $r > R$!

5. Medan Magnet di Sekitar Toroida

Kumparan yang berbentuk toroida adalah kawat yang dililitkan N pada benda berbentuk *doughnut* (hampir seperti dua bola konsentris dan masing-masing lilitan saling berdekatan, lihat gambar 6.17. Besarnya medan magnet dalam toroida yang dililiti kawat berarus sebanyak N lilitan dapat diperoleh dari persamaan 6.22 adalah

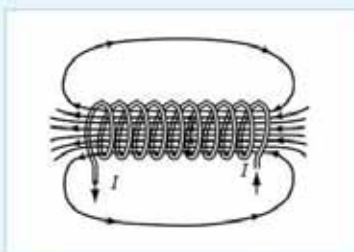
$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r} \quad (6.25)$$



Gambar 6.16. Medan magnet di dalam toroida dengan arus I mengalir dalam lilitan.

6. Medan Magnet Solenoida

Solenoida adalah kawat panjang yang dililit berbentuk heli lihat gambar 6.17.



Gambar 6.17. Garis gaya magnet dalam solenoida

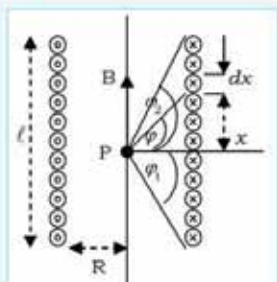
a. Medan Magnet pada Sumbu Selenoida

Sebuah selenoida yang panjangnya ℓ dan jari-jarinya R terdiri dari N lilitan yang dililit sangat rapat. Selenoida dialiri arus I yang konstan, bagaimanakah besarnya medan magnet di titik P yang terletak pada sumbu di dalam selenoida?

Setiap loop dalam selenoida akan menghasilkan medan magnet pada sebuah titik yang terletak pada sumbu loop, yaitu ditunjukkan pada persamaan 6.19 Medan magnet total di titik P merupakan superposisi medan magnet dari semua loop. Pada elemen panjang dx terdapat lilitan sebanyak

$\frac{N}{\ell} dx$, maka arus total yang mengalir pada elemen dx adalah $I \frac{N}{\ell} dx$, lihat gambar 6.19. Dengan menggunakan persamaan 6.19, medan magnet di titik P yang ditimbulkan oleh elemen panjang ds dengan arus total $I \frac{N}{\ell} dx$ dapat dihitung sebagai

$$dB = \frac{\mu_0 IR^2}{2(z^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{\mu_0 R^2}{2(x^2 + R^2)^{\frac{3}{2}}} I \frac{N}{\ell} dx \quad (6.26)$$



Gambar 6.18 Medan Magnet di titik pada sumbu selenoida

Kreasi Fisika

Salah satu aplikasi selenoida dalam kehidupan sehari-hari adalah pada bel pintu. Ketika saklar ditekan, arus mengalir menuju selenoida sehingga terjadilah elektromagnetik. Di sekitar selenoida tersebut timbul gaya magnet yang akan menarik besi (striker) sehingga besi tersebut akan memukul lonceng. Lihat gambar! Kalian telah mempelajari induksi magnet pada selenoida, cobalah untuk menerapkannya dengan membuat bel pintu. Cara pembuatannya cukup mudah, bukan? Berkreasilah dan kembangkan jiwa kewirausahaan kalian dengan menghasilkan alat-alat sendiri berdasarkan ilmu yang sudah kalian pelajari!



Sumber: Encyclopædia Tay, Inc
Gambar 6.19 Skema bel pintu

Dari gambar 6.19 bisa dinyatakan bahwa $x = R \tan \varphi$, dan diperoleh $dx = R \sec^2 \varphi d\varphi$. Bila dx dimasukkan ke dalam persamaan 6.26 dan kemudian diintegrasikan, maka diperoleh

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\ell} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \cos \varphi d\varphi = \frac{\mu_0 NI}{2\ell} (\sin \varphi_2 - \sin \varphi_1) \quad (6.27)$$

Bila solenoida cukup panjang, $\ell \gg R$, dan P adalah titik tengah sumbu maka $\varphi_2 = 90^\circ$ dan $\varphi_1 = -90^\circ$ maka persamaan 6.27 dapat ditulis menjadi

$$B = \frac{\mu_0 NI}{2\ell} (1 - (-1)) = \mu_0 nI \quad (6.28)$$

Di mana $n = \frac{N}{\ell}$ adalah jumlah lilitan per satuan panjang. Persamaan 6.28 adalah besarnya medan magnet di titik tengah sumbu solenoida yang dialiri arus I .

b. Medan Magnet pada Ujung Sumbu Solenoida

Bila titik P terletak pada ujung sumbu solenoida yang panjang, maka $\varphi_2 = 90^\circ$ dan $\varphi_1 = 0^\circ$ sehingga besarnya medan magnet di titik P dari persamaan 6.27 adalah

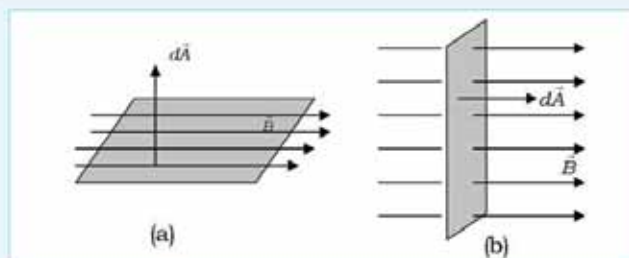
$$B = \frac{\mu_0 nI}{2} \quad (6.29)$$

Persamaan 6.29 hanya berlaku untuk titik di kedua ujung sumbu solenoida yang mempunyai lilitan per satuan panjang n dan dialiri arus I .

D. Fluks Magnet

Pada pelajaran kelistrikan kalian sudah memahami fluks listrik bukan? Ada beberapa kesamaan dan perbedaan pada hukum-hukum yang menguasai listrik dan magnet, salah satu sifat yang sama adalah definisi tentang fluks. Bila dalam elemen luasan $d\vec{A}$ terdapat medan magnet \vec{B} maka besarnya fluks magnet yang melewati luasan $d\vec{A}$ adalah $\vec{B} \cdot d\vec{A}$ di mana $d\vec{A}$ adalah vektor yang tegak lurus pada permukaan dan besarnya sama dengan dA . Maka besarnya fluks magnet yang melewati seluruh permukaan adalah

$$\Phi_m = \int \vec{B} \cdot d\vec{A} \quad (6.30)$$



Gambar 6.20 (a) Medan magnet tegak lurus pada $d\vec{A}$ maka $\Phi = 0$, (b) Medan magnet sejajar dengan $d\vec{A}$ maka $\Phi_m = B\vec{A}$

Contoh sederhana penentuan fluks magnet, misalnya medan magnet homogen melewati bidang datar yang luasnya \vec{A} dan vektor medan magnet \vec{B} membentuk sudut θ dengan garis normal bidang $d\vec{A}$, maka besarnya fluks magnet dapat diperoleh dari persamaan 6.30 sebagai

$$\Phi_m = BA \cos \theta \quad (6.31)$$

Bila medan magnet terletak pada bidang yang luasnya \vec{A} maka fluks magnetnya nol karena vektor \vec{B} tegak lurus terhadap garis normal bidang $d\vec{A}$.

Contoh Soal 6.4

Dua buah loop identik persegi panjang dengan panjang b dan lebar a , masing-masing diletakkan pada sebelah kiri dan kanan dari kawat panjang yang dialiri arus I . Kawat berarus dan kedua loop terletak pada bidang kertas, dan sisi loop yang sejajar dengan kawat berarus adalah sisi yang panjang (b), lihat gambar 6.21. Tentukan (a) besarnya medan magnet pada kedua sisi yang panjang dan tentukan pula arahnya! (b) fluks magnet yang melewati loop!

Penyelesaian:

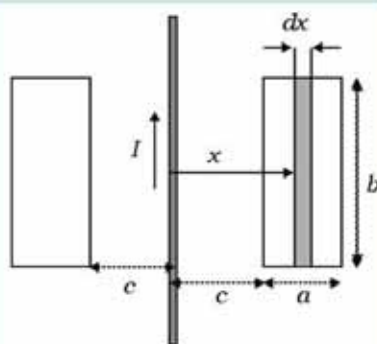
Berdasarkan soal di atas maka $A = ab$, \vec{B} dihasilkan oleh kawat berarus, maka harus ditentukan lebih dahulu dengan mengaplikasikan hukum Ampere. Kalian akan dapat menunjukkan bahwa arah medan magnet di sebelah kiri dan kanan kawat penghantar berbeda (ingat kaidah/aturan tangan kanan).

Pertama kita hitung besarnya medan magnet pada titik yang berjarak x dari kawat penghantar dengan menggunakan hukum Ampere, persamaan 6.22 yang

memberikan hasil $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi x}$,

dan arahnya masuk ke bidang kertas. Besarnya medan magnet pada sisi b yang berjarak c diperoleh dengan mengganti $x = c$, maka

$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi c}$. Dan untuk sisi b



Gambar 6.21 Fluks magnet yang dihasilkan oleh kawat panjang berarus dan melewati loop dengan luas ab yang berjarak c dari kawat

yang jaraknya $(c + a)$ dari kawat berarus adalah $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi(c + a)}$.

Di sebelah kiri kawat penghantar, arah medan magnet keluar dari bidang kertas dan besarnya masing-masing sama karena jaraknya dari kawat yang berarus sama besar. Karena medan magnet yang dihasilkan kawat berarus tergantung pada posisi, maka fluks magnet yang lewat loop juga merupakan fungsi posisi, makin jauh jaraknya dari kawat berarus, makin kecil medan magnet yang dihasilkan.

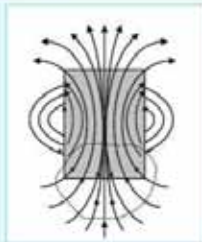
Besarnya fluks yang melewati permukaan yang luasnya $b \, dx$ adalah

$d\phi_m = B(b \, dx) = \frac{\mu_0 I}{2\pi x} (b \, dx)$, maka fluks total yang melewati permukaan loop yang luasnya (ba) adalah

$$\begin{aligned}\Phi_m &= \int_c^{(c+a)} \frac{\mu_0 I b \, dx}{2\pi x} = \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \int_c^{c+a} \frac{dx}{x} \\ &= \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln x \\ &= \frac{\mu_0 I b}{2\pi} (\ln(c + a) - \ln(c)) \\ &= \frac{\mu_0 I b}{2\pi} \ln \frac{c + a}{c}\end{aligned}$$

E. Hukum Gauss untuk Medan Magnet

Untuk medan magnet, jumlah garis gaya magnet yang melalui permukaan tertutup selalu nol karena garis gaya magnet selalu membentuk lintasan tertutup. Sebagai contoh, medan magnet yang ditimbulkan di sekitar kawat berarus selalu membentuk lintasan tertutup. Gambar 6.22 menunjukkan garis gaya pada magnet batang. Pada permukaan tertutup yang dibatasi oleh garis putus-putus pada salah satu ujung magnet dapat dilihat bahwa jumlah garis gaya yang masuk sama dengan jumlah garis gaya yang keluar dari permukaan tertutup, maka untuk setiap permukaan tertutup jumlah garis gaya magnet selalu nol, yang dapat dituliskan sebagai



Gambar 6.22 Garis-garis gaya magnet pada magnet batang membentuk loop tertutup. Fluks total pada permukaan tertutup nol

$$\Phi_m = \oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0 \quad (6.32)$$

Dari persamaan 6.32 ditunjukkan bahwa untuk medan magnet, fluks yang melewati permukaan tertutup selalu nol sebab bila sebuah benda bersifat magnet, benda tersebut selalu mempunyai dua kutub yang kuat medan magnetnya sama besar, garis gayanya selalu membentuk loop (lintasan tertutup).

F. Generalisasi Hukum Ampere

Kalian sudah mengetahui bahwa muatan yang bergerak atau arus listrik dapat menghasilkan medan magnet. Bila arus mengalir pada konduktor yang sangat simetri, besarnya medan magnet yang ditimbulkan dapat dihitung dengan hukum Ampere $\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I$.

Di mana $\oint ds$ adalah lintasan tertutup total yang dilewati arus konduksi. Bila Q adalah muatan kapasitor sesaat, maka arus konduksi didefinisikan sebagai $I = \frac{dQ}{dt}$

Bila pada saat kapasitor dimuati atau dilucuti, perubahan medan listrik antara dua keping dapat dipikirkan sebagai jenis arus yang merupakan jembatan diskontinuitas arus konduksi. Karena adanya diskontinuitas arus, maka didefinisikan I_d sebagai

$$I_d = \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \quad (6.33)$$

Di mana $\Phi_E = \int \vec{E} \cdot d\vec{A}$ dan \vec{E} adalah medan listrik antara kapasitor, $E = \frac{Q}{\epsilon_0 A}$ dan $\Phi_E = \frac{Q}{\epsilon_0}$.

Menurut Maxwell, baik arus induksi maupun simpangan arus, keduanya melewati permukaan lintasan tertutup, maka persamaan untuk hukum Ampere direvisinya sebagai

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 (I + I_d) = \mu_0 \left(I + \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} \right) \quad (6.34)$$

Persamaan 6.34 berlaku lebih umum daripada Hukum Ampere, yaitu bila pada suatu daerah dalam ruang terdapat medan magnet, maka disitu terdapat pula medan listrik karena pada umumnya gejala kelistrikan dan kemagnetan terjadi bersama-sama.

G. Magnetisme dalam Materi

Timbulnya medan magnet di dalam loop yang berarus memberikan pertanda bahwa ada medan magnet di dalam material. Loop yang berarus menimbulkan medan magnet yang dengan momen magnetik. Sedangkan momen magnetik dalam material

KISI

Pada jarum penunjuk tangki bahan bakar kendaraan bermotor menggunakan prinsip elektromagnetik untuk mengindikasikan volume bahan bakar tersebut. Kumparan diletakkan di antara magnet permanen. Besarnya medan magnet bergantung pada bahan bakar, kedudukan pengapung terhadap permukaan air mengontrol/mengubah besarnya resistor variabel sehingga mempengaruhi besarnya arus yang mengalir dalam rangkaian. Ketika volume bahan bakar besar, kedudukan pengapung di atas. Hal ini menyebabkan nilai resistor variabel kecil, sehingga arus yang mengalir dalam rangkaian besar dan medan magnetik dalam kumparan menjadi besar. Besarnya medan magnetik ini menyebabkan defleksi jarum penunjuk bensin besar begitu pula sebaliknya.

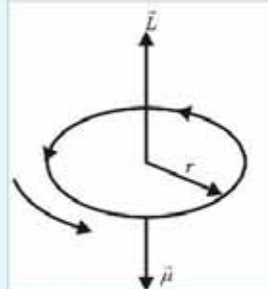


Sumber: All Colour Science Encyclopedia

yang bersifat magnet berasal dari elektron yang mengorbit inti. Proton dan neutron dalam inti juga saling berotasi satu sama lain (seperti bintang kembar).

Momen magnetik yang dihasilkan oleh elektron adalah kombinasi antara momen magnetik dari gerak elektron mengitari inti dan dari gerak elektron yang berotasi terhadap sumbunya sendiri (spin).

Momen magnetik yang dihasilkan oleh elektron karena berotasi terhadap sumbunya sendiri dan disebut sebagai momen magnetik spin yang merupakan sifat intrinsik elektron. Bila momentum angular spin dari elektron adalah \vec{S} , maka momen dipol magnetiknya adalah



Gambar 6.23 Elektron yang mengorbit inti atom mempunyai momentum orbital \vec{L} dan momen magnetik $\vec{\mu}$

$$\vec{\mu}_s = -\frac{e}{m} \vec{S} = -\frac{e}{2m} \hbar \quad (6.35)$$

di mana $\frac{e}{2m} \hbar = 9,27 \times 10^{-24} \text{ J/T}$, besarnya S yang diramalkan dalam

kuantum adalah $S = \frac{\hbar}{2} = 5,2729 \times 10^{-35} \text{ J.s}$, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$, $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}$.

h adalah tetapan Planck dan $\frac{\hbar}{2}$ disebut Magnetan Bohr. Di dalam material yang jumlah elektronnya genap, elektron selalu berpasangan, sehingga momentum angular spin saling meniadakan. Untuk atom yang jumlah elektronnya ganjil, atom tersebut mempunyai momentum angular spin dan orbital. Beberapa momen magnetik material ditunjukkan pada tabel 6.1.

Tabel 6.1 Momen Magnetik Atom

Atom/Ion	Momen Magnetik (10^{-24} J/T)
H	9,27
Ce ³⁺	19,8
Yb ³⁺	37,1

Momen magnetik inti yang terdiri dari proton dan neutron diabaikan terhadap momen magnetik yang dihasilkan elektron.

1. Magnetisasi dan Kuat Medan Magnet

Material yang bersifat magnet digambarkan dengan besaran yang disebut vektor magnetisasi M yang besarnya sama dengan momen magnetik per satuan volume. Karena material mempunyai momen magnetik yang terkandung di dalamnya, maka kalian bisa meramalkan besarnya medan magnet material tersebut bila dimasukkan ke dalam medan magnet luar. Kalian akan setuju bahwa besarnya medan magnet total pada suatu material tergantung pada momen magnetik yang dimilikinya dan juga medan magnet luar yang mempengaruhinya.

Pada bagian sebelumnya kalian sudah mempelajari tentang medan magnet yang dihasilkan solenoida pada titik-titik di dalam solenoida. Misalnya besarnya medan magnet tersebut adalah B_0 , kira-kira apa yang terjadi bila di dalam solenoida tersebut kita masukkan magnet batang? Coba di antara kalian siapa yang setuju bila medan magnet di dalam solenoida menjadi lebih besar? Dengan menggunakan prinsip superposisi maka besarnya medan magnet dalam solenoida menjadi lebih besar, yaitu

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \mu_0 \vec{M} = \vec{B}_0 + \vec{B}_M \quad (6.36)$$

Dari persamaan 6.36 kemudian timbul istilah kuat medan magnet

H yang didefinisikan sebagai $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{M} = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0}$. Dengan

menggunakan besaran kuat medan magnet H , maka persamaan 6.36 dapat dituliskan kembali menjadi

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (6.37)$$

Di mana satuan H dan M sama dalam satuan SI, satuan keduanya adalah A/m.

Pada contoh solenoida di atas, besarnya medan magnet pada titik di tengah sumbu solenoida adalah $B_0 = \mu_0 nI$. Bila tidak ada material magnet yang dimasukkan, maka besarnya kuat medan magnet $H = nI$.

Bila di dalam solenoida diisi material magnetik dan kuat arus yang mengalir dalam solenoida dibuat tetap, maka H di dalam material juga tetap konstan, yaitu nI , karena H hanya dihasilkan oleh kumparan dalam solenoida dan yang berubah adalah medan

magnet totalnya, B . Untuk sebagian besar material, seperti diamagnetik dan paramagnetik, vektor magnetisasi \vec{M} dari material yang dimasukkan ke dalam medan magnet sebanding dengan kuat medan magnet \vec{H} ,

$$\vec{M} = \chi \vec{H} \quad (6.38)$$

di mana χ adalah besaran tanpa dimensi dan disebut suseptibilitas magnetik. Untuk material paramagnetik, χ adalah positif yang berarti vektor \vec{M} searah dengan vektor \vec{H} . Untuk material diamagnetik, χ negatif karena \vec{M} berlawanan arah dengan \vec{H} . Hubungan linier antara \vec{M} dan \vec{H} tidak berlaku untuk material feromagnetik. Bila persamaan 6.38 dimasukkan ke persamaan 6.37 diperoleh

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H} = \kappa_m \vec{H} \quad (6.39)$$

di mana κ_m disebut permeabilitas material. Bila dibandingkan dengan permeabilitas untuk ruang hampa μ_0 , maka untuk

paramagnetik $= \kappa_m > \mu_0$

diamagnetik $= \kappa_m < \mu_0$

feromagnetik $= \kappa_m \gg \mu_0$.

Karena χ adalah terlalu kecil untuk material paramagnetik dan diamagnetik, maka harga κ_m hampir sama dengan μ_0 . Tetapi untuk material feromagnetik, harga κ_m ribuan kali harga μ_0 . Perlu diingat bahwa κ_m bukanlah karakteristik dari material maka aplikasi persamaan 6.39 untuk material feromagnetik harus hati-hati. Berikut ini sedikit tentang karakteristik material ditinjau dari sifat kemagnetannya.

2. Diamagnetik

Material yang bersifat diamagnetik tidak mempunyai momen dipol magnetik yang permanen. Bila material diamagnetik dimasukkan dalam medan magnet luar, maka akan terinduksi beberapa momen dipol magnet yang arahnya melawan arah medan magnet luar. Timbulnya momen dipol magnet dapat digambarkan sebagai berikut:

Bila mula-mula sepasang elektron yang mengorbit inti mempunyai kecepatan yang sama tetapi arah orbitnya berlawanan, kemudian bila dimasukkan ke dalam medan magnet maka elektron tersebut mendapat tambahan gaya sentripetal $\vec{F} = e\vec{v} \times \vec{B}$. Gaya sentripetal ini menaikkan kecepatan elektron yang bergerak berlawanan dengan medan luar dan menurunkan kecepatan elektron yang bergerak searah dengan medan luar. Beberapa material

superkonduktor mempunyai resistansi nol untuk arus DC bila suhunya di bawah suhu kritis tertentu. Beberapa superkonduktor bersifat diamagnetik, maka medan magnet luar ditolak sehingga medan magnet di dalamnya nol. Peristiwa penolakan fluks medan magnet ini disebut efek Meissner.

3. Paramagnetik

Material paramagnetik mempunyai susceptibilitas positif tetapi harganya kurang dari satu ($0 < \chi < 1$). Harga susceptibilitas positif ini karena material paramagnetik mempunyai momen dipol magnetik permanent. Momen dipole magnetik berinteraksi sangat lemah karena berinteraksi secara random tanpa adanya medan magnet luar. Bila material paramagnetik dimasukkan ke dalam medan magnet luar, momen dipole magnetik akan terorientasi searah dengan arah medan magnet luar, tetapi gerakan termal elektron menyebabkan orientasi momen dipol magnetik secara random. Dari eksperimen ditunjukkan bahwa vektor magnetisasi material paramagnetik berbanding lurus dengan medan magnet luar dan berbanding terbalik dengan suhu mutlak, yang dapat dituliskan sebagai

$$\vec{M} = C \frac{\vec{B}}{T} \quad (6.40)$$

Persamaan 6.40 terkenal dengan hukum Curie dan C adalah konstanta Curie. Jadi, sifat magnetik naik dengan naiknya medan magnet luar yang diaplikasikan pada material, tetapi menurun dengan naiknya suhu.

Contoh Soal 6.5

Bila gas paramagnetik pada suhu 300 K dimasukkan ke dalam medan magnet homogen yang besarnya $B = 1,5 \text{ T}$, atom-atom gas akan mempunyai momen dipol magnetik $\mu = 1,0 \mu_B$. Hitunglah rata-rata energi kinetik translasi atom gas!

Penyelesaian:

Dari teori kinetik gas diperoleh

$$\begin{aligned} K &= \frac{3}{2} kT = \frac{3}{2} (1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K})(300 \text{ K}) \\ &= 6,2 \times 10^{-21} \text{ J} = 0,039 \text{ eV} \end{aligned}$$

4. Feromagnetik

Besi, cobalt, nikel, gadolinium dan dysprosium adalah material feromagnetik. Material feromagnetik digunakan untuk memagnetkan material yang lemah kemagnetannya. Dalam material feromagnetik, momen dipol magnet tersusun sejajar dan arahnya sama, walaupun berada dalam medan magnet luar yang lemah. Sekali momen dipol tersusun sejajar, maka akan tetap sejajar walaupun medan magnet luarnya dihilangkan.

Semua material feromagnetik mempunyai daerah mikroskopik yang disebut domain, dimana semua momen dipol magnetik tersusun secara sejajar. Domain ini volumenya bervariasi dari 10^{-12} sampai 10^{-6} m^3 yang berisi atom sekitar 10^{17} sampai 10^{21} buah. Batas antara daerah domain disebut dinding domain. Orientasi momen dipol magnetik pada dinding domain berbeda. Bila material feromagnetik mula-mula tidak mengandung magnet maka orientasi momen dipol magnetik adalah random, tetapi bila dimasukkan dalam medan magnet luar, maka momen dipol magnetik akan tersusun sejajar dan arahnya sama. Untuk mengukur sifat-sifat material feromagnetik, digunakan contoh berbentuk toroida yang dililiti dengan kawat penghantar dan peralatan ini kadang disebut sebagai Cincin Rowland.

Tugas 6.3

Aplikasi elektromagnet dapat digunakan pada CD Room komputer. Banyak sekali penggunaan elektromagnet dalam kehidupan sehari-hari. Coba kalian sebutkan dan jelaskan prinsip kerjanya!

Rangkuman

1. Benda bermuatan yang melaju di medan magnet homogen dengan laju V , maka akan timbul gaya magnet

$$\vec{F} = q \vec{v} \times \vec{B} = qvB \sin \theta.$$

2. Partikel bermuatan yang memasuki medan magnet homogen akan bergerak melingkar dengan jari-jari

$$\text{sebesar } r = \frac{mv}{qB}.$$

3. Gaya magnet pada kawat berarus listrik yang berada pada medan magnet adalah $\vec{F} = I \vec{\ell} \times \vec{B}$.

4. Torsi yang dihasilkan oleh loop berarus listrik yang terdiri dari N lilitan adalah $\vec{\tau} = N\vec{I}\vec{A} \times \vec{B} = \vec{\mu}_{\text{total}} \times \vec{B}$.

5. Besarnya induksi magnetik pada titik p berjarak a dari kawat konduktor berarus listrik adalah

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad \text{untuk kawat lurus panjang berhingga}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad \text{untuk kawat lurus panjang tak hingga.}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{4\pi a} (\cos \theta_1 - \cos \theta_2) \quad \text{untuk kawat lurus panjang berhingga}$$

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi a} \quad \text{untuk kawat lurus panjang tak hingga.}$$

6. Besarnya induksi magnet di titik yang terletak pada sumbu kawat konduktor berbentuk lingkaran berarus

$$\text{listrik adalah } B = \frac{\mu_0 I}{2R}.$$

7. Besarnya induksi magnet pada titik perpanjangan sumbu kawat konduktor berbentuk lingkaran dengan jari-jari R

$$\text{berarus listrik adalah } B = \frac{\mu_0 IR^2}{2z^3} \quad \text{di mana } z \text{ adalah jarak titik dari sumbu kawat.}$$

8. Besarnya gaya magnet antara dua kawat penghantar yang

$$\text{dialiri arus listrik adalah } F = \frac{\mu_0 I_1 I_2 \ell}{2\mu a}.$$

9. Besarnya gaya tarik-menarik/tolak-menolak persatuan panjang antara dua kawat penghantar yang dialiri arus

$$\text{listrik adalah } \frac{F}{\ell} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\mu a}.$$

10. Besarnya medan dalam toroida adalah $B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$.

11. Besarnya medan magnet di titik tengah sumbu selenoida adalah $B = \mu_0 nI$

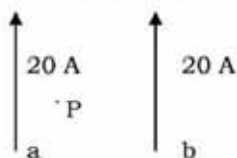
12. Besarnya medan magnet di titik ujung sumbu selenoida adalah $B = \frac{\mu_0 nI}{2}$

13. Banyaknya fluks magnet yang menembus suatu bidang adalah $\Phi_m = BA \cos \theta$.
14. Sifat kemagnetan bahan dalam materi dikategorikan:
- diamagnetik
 - paramagnetik
 - feromagnetik

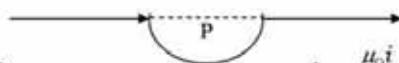
Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

1. Dua kawat panjang a dan b diletakkan sejajar pada jarak 8 cm satu sama lain (gambar di bawah). Tiap kawat dilalui arus sebesar 20 A. Jika $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$, maka induksi magnetik di titik P yang terletak di antara kedua kawat pada jarak 2 cm dari kawat a adalah (dalam militesla) . . .



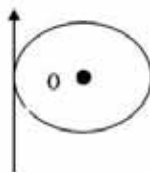
- 0,1
 - 0,13
 - 0,2
 - 0,25
 - 0,3
2. Seutas kawat lurus dilengkungkan seperti pada gambar dan dialiri arus i . Induksi magnetik di titik p adalah . . .



- 0
- $\frac{\pi_0 i}{\pi a}$
- $\frac{\mu_0 i}{2\pi a}$
- $\frac{\mu_0 i}{2a}$
- $\frac{\mu_0 i}{4a}$

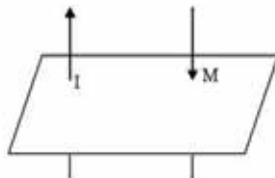
3. Kawat lurus yang panjang menembus tegak lurus bidang kertas A. Titik P berada di sebelah kanan pada jarak a dari kawat itu pada bidang kertas. Bila kawat dialiri arus I dengan arah dari bawah ke atas, maka arah induksi magnetik B di titik P adalah
 - a. tegak lurus bidang A arah ke bawah
 - b. tegak lurus bidang A arah ke atas
 - c. dari titik tembus kawat dengan bidang A menuju ke P
 - d. menyingung lingkaran dengan jari-jari a di P arah ke belakang
 - e. menyingung lingkaran dengan jari-jari a di P arah ke muka
4. Sebuah zarah bermuatan listrik positif bergerak dengan kecepatan sebesar 2×10^5 m/s searah dengan sumbu x positif di dalam ruang yang mengandung medan listrik dan medan magnetik tetapi tidak berpengaruh terhadap gerakan ini. Jika kuat medan listrik 8×10^4 N/C searah dengan sumbu z positif, maka besar dan arah induksi magnetik adalah...
 - a. 10 T searah dengan sumbu z positif
 - b. 4 T searah dengan sumbu z negatif
 - c. 0,4 T searah dengan sumbu y negatif
 - d. 0,4 T searah dengan sumbu y positif
 - e. 2,5 T searah dengan sumbu x negatif
5. Manakah dari partikel-partikel berikut mengalami gaya magnetik ketika berada dalam medan magnetik homogen?
 - (1) sebuah neutron yang bergerak tegak lurus medan magnetik.
 - (2) sebuah elektron stasioner (diam).
 - (3) sebuah proton yang bergerak searah medan magnetik.
 - a. bukan ketiganya
 - b. hanya (1)
 - c. hanya (3)
 - d. hanya (2) dan (3)
 - e. (1), (2), dan (3)
6. Dua buah kawat, yang satu melingkar dan yang lainnya lurus. Kedua kawat hampir berimpit di titik P. Kawat melingkar berarus listrik $\frac{2}{\pi}$ A dan berjari-jari 2 cm, sedangkan kawat lurus berarus listrik 6 A dengan arah seperti pada gambar. Besar induksi magnetik di pusat lingkaran O akibat dua arus tersebut adalah
 - a. 2×10^{-5} T
 - b. 4×10^{-5} T
 - c. 6×10^{-5} T
 - d. 8×10^{-5} T
 - e. 9×10^{-5} T

7. Solenoida dengan panjang 25 cm terdiri dari 800 lilitan. Jika pada solenoida dialiri arus 2 A, maka induksi magnetik yang terjadi pada pusat solenoida tersebut adalah
- $2,56 \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2$
 - $5,12 \pi \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2$
 - $6,64 \pi \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2$
 - $\dots, \pi \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2$
 - $8,46 \pi \times 10^{-3} \text{ Wb/m}^2$
8. Bidang kumparan segi empat sejajar dengan medan magnet homogen. Ketika arus dialirkan melalui kumparan, maka arus tersebut menghasilkan kopel yang cenderung untuk memutar kumparan. Momen kopel yang dihasilkan arus yang dialirkan dapat diperbesar dengan:
- (1) Memperbesar luas kumparan
 - (2) Memperbanyak jumlah lilitan pada kumparan
 - (3) Mengurangi besar induksi magnetik
- (1), (2), (3) benar
 - hanya (1) dan (2)
 - hanya (2) dan (3)
 - hanya (1)
 - hanya (3)
9. Sebuah kumparan terdiri dari 50 lilitan berbentuk bujur sangkar dengan sisi 20 cm. Kumparan dialiri arus listrik 5 A dan berada dalam medan magnet homogen $0,2 \times 10^{-2} \text{ Wb/m}^2$. Bidang kumparan tegak lurus terhadap garis gaya magnet. Momen kopel yang terjadi pada kumparan saat bidang kumparan sejajar arah medan magnet tersebut adalah
- 10 N.m
 - 1 N.m
 - 0,1 N.m
 - 0,04 N.m
 - 0,02 N.m
10. Dua buah partikel massanya $m_1 : m_2 = 2 : 1$ dan muatannya $q_1 : q_2 = 2 : 1$. Kedua partikel itu bergerak melingkar dalam bidang yang tegak lurus medan magnetik homogen. Bila besar momentum kedua partikel itu sama, maka perbandingan jari-jari orbit partikel-partikel itu, $r_1 : r_2$, adalah
- 4 : 1
 - 2 : 1
 - 1 : 1
 - 1 : 2
 - 1 : 4



B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Dua kawat yang lurus dan panjang terpisah pada jarak $2a$. Kedua kawat dialiri arus yang sama besar dengan arah yang berlawanan. Induksi magnetik di tengah-tengah antara kedua kawat adalah B . Hitung induksi magnetik di titik yang berjarak a dari kawat pertama dan berjarak $3a$ dari kawat kedua!
2. Dua kawat berarus listrik sejajar, arah arusnya berlawanan. $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ N.m/A). Jika panjang kedua kawat masing – masing sama dengan 1m dan jarak antara kedua kawat 150 cm, maka hitung besar gaya tiap satuan panjang yang dialami kawat berarus 1A!
- 3.



Dua kawat lurus I dan M di pasang sejajar dan terpisah sejauh 1,5 cm. Kedua kawat dialiri arus listrik, masing-masing 250 mA dan 500 mA dengan arah berlawanan. Titik P berada di antara kedua kawat itu 0,5 cm dari kawat I. Hitung besar induksi magnetik di titik P akibat kedua arus tersebut!

4. Kawat yang panjangnya 20 cm terbentang dalam medan magnetik homogen. Kawat dialiri arus listrik 2,5A ke utara. Hitung gaya magnet yang dialami kawat!
5. Sebuah zarah bermuatan listrik bergerak dan masuk ke dalam medan magnet sedemikian rupa sehingga lintasannya berupa lingkaran dengan jari-jari 10 cm. Jika zarah lain bergerak dengan laju 4,2 kali zarah pertama, maka jari-jari lingkaran 20 cm. Hitung perbandingan antara massa bermuatan zarah pertama dengan zarah kedua, apabila kedua zarah bermuatan sama!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab VII

Induksi Elektromagnetik



Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat memformulasikan konsep induksi magnetik dan arus bolak-balik serta penerapannya.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Arus
2. Induksi

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

1. Hukum Faraday
2. GGL induksi dan medan listrik
3. Aplikasi induksi elektromagnetik
4. Persamaan Maxwell
5. Induktansi
6. Rangkaian arus bolak-balik
7. Transformator dan Transmisi daya

Pada diskusi sebelumnya kita telah menelaah timbulnya medan magnet di sekitar kawat berarus, hal ini berarti arus listrik dapat menciptakan medan magnet. Apakah proses menghasilkan tersebut dapat berlaku sebaliknya, yaitu apakah medan magnet dapat menimbulkan medan listrik?

Untuk dapat menunjukkan apakah peristiwa timbulnya medan magnet dan medan listrik dapat dibolak-balik, silahkan kalian lakukan kegiatan di bawah ini secara berkelompok.

Kegiatan 7.1

Tujuan:

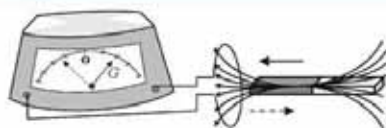
Menyelidiki bahwa arus listrik dapat terbentuk dalam loop tertutup bila pada loop terjadi perubahan medan magnet.

Alat dan Bahan:

Sebuah galvanometer, kawat penghantar yang dibuat loop dan magnet permanent (magnet batang)

Prosedur:

1. Cobalah kalian susun peralatan seperti pada gambar!
2. Hubungkan sebuah kumparan yang hanya terdiri dari satu lilitan dengan galvanometer.
3. Coba amati jarum galvanometer (G) dan catat angka yang ditunjuk oleh jarum G sebelum magnet batang digerakkan masuk ke dalam kumparan.
4. Sekarang dekatkan magnet batang tersebut perlahan-lahan sampai masuk ke dalam kumparan, amati lagi angka yang ditunjuk oleh jarum G pada saat magnet bergerak masuk ke kumparan. Bagaimana angka yang ditunjuk jarum G bila magnet diam di dalam kumparan? Catat pula angka yang ditunjuk jarum G pada saat magnet diam di dalam kumparan.
5. Bagaimanakah angka yang ditunjuk G pada pengamatan (3) dan (4).



Gambar 7.1 Galvanometer, sebuah kumparan dan magnet batang untuk menunjukkan perubahan medan magnet menghasilkan arus listrik

6. Jauhkan magnet secara perlahan-lahan, amati setelah magnet berada di luar kumparan, catat lagi angka yang ditunjuk jarum G.
7. Ulangi langkah 3-6 dan kalau perlu gunakanlah magnet yang berbeda kuat medannya!
8. Tulislah kesimpulan dari kegiatanmu dan bandingkan dengan hasil kegiatan yang sudah tertulis di buku fisika!

Kesimpulan:

Dari data yang kalian kumpulkan, kalian mungkin memperoleh kesimpulan sebagai berikut: Arus listrik timbul di dalam kumparan pada saat magnet dimasukkan atau dikeluarkan dari kumparan. Bila magnet diam di dalam kumparan atau di luar kumparan, maka dalam kumparan tidak terdapat arus listrik. Jadi, dari percobaan ini dapat disimpulkan bahwa timbulnya arus listrik dalam kumparan karena adanya perubahan medan magnet, yaitu pada saat magnet digerakkan masuk atau keluar.

Tugas 7.1

Kalian dapat melakukan percobaan di atas dengan menggunakan dua toroida yang dililiti kumparan, yaitu kumparan primer dan sekunder. Kumparan primer dihubungkan dengan baterai lewat sebuah saklar dan kumparan sekunder dihubungkan dengan galvanometer. Coba apa yang terjadi bila saklar disambung dan diputus?

A. Hukum Faraday

Kegiatan di atas mula-mula dilakukan oleh Faraday, dan dari data yang diperoleh dapat disimpulkan bahwa arus listrik terjadi karena adanya gaya gerak listrik induksi (GGL) sebagai hasil dari perubahan medan magnet, perubahan medan magnet berupa perubahan fluks magnet yang melewati kumparan. Secara matematik Faraday menyatakan,

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (7.1)$$

Bila kumparan yang digunakan terdiri dari N lilitan, maka

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (7.2)$$

Bila bidang loop tidak tegak lurus pada arah medan magnet yang berubah, tetapi normal bidang loop membentuk sudut θ dengan arah medan magnet B , dan berdasarkan definisi fluks, maka persamaan 7.1 dapat ditulis kembali menjadi

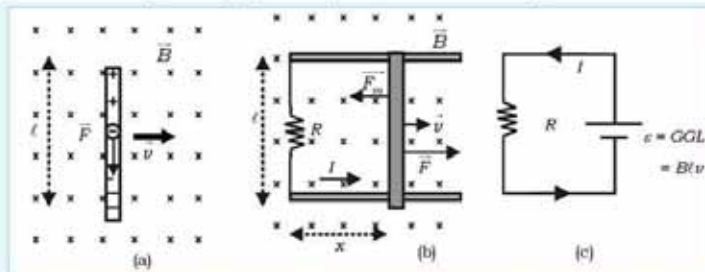
$$\varepsilon = -\frac{d}{dt}(BA \cos \theta) \quad (7.3)$$

Persamaan 7.3 menunjukkan besarnya GGL yang ditimbulkan oleh perubahan fluks magnet per satuan waktu.

1. GGL Sebuah Penghantar yang Bergerak Dalam Medan Magnet

Kalian telah mempelajari bahwa bila kawat berarus diletakkan dalam medan magnet, kawat tersebut mengalami gaya magnet. Disini kawat diletakkan dalam keadaan diam di dalam medan magnet. Apa yang terjadi bila kawat yang berarus tersebut juga digerakkan dalam medan magnet?

Misal sebuah penghantar lurus panjangnya ℓ digerakkan dengan kecepatan konstan v dan arah geraknya tegak lurus pada medan magnet B yang homogen, lihat gambar 7.2. Di dalam konduktor terdapat muatan bebas, maka elektron-elektron dalam konduktor mengalami gaya magnet sebesar $F = qvB$.



Gambar 7.2 (a) Sebuah batang konduktor lurus panjang bergerak dalam medan magnet homogen dengan kelajuan v . (b) Sebuah batang konduktor panjang bergerak di atas sepasang rel konduktor dengan kelajuan v . (c) Rangkaian loop dari gerak konduktor pada gambar (b).

Karena elektron ikut bergerak bersama batang, berarti elektron juga bergerak dengan kecepatan v dan tegak lurus pada medan magnet yang arahnya masuk ke kertas, dengan menggunakan aturan tangan kanan untuk muatan negatif, maka elektron mengalami gaya magnet yang terletak di atas bidang kertas arahnya ke bawah sehingga menyebabkan muatan negatif terkumpul di bagian bawah batang dan muatan positif pada bagian atas batang. Muatan akan berhenti mengalir ke bawah bila gaya magnet diimbangi dengan medan listrik di dalam konduktor yang diakibatkan oleh terkumpulnya muatan di bagian atas dan bawah konduktor, yaitu

$$qE = qvB \quad \text{atau} \quad E = vB$$

Karena medan listrik dalam konduktor konstan maka beda potensial antara ujung konduktor adalah

$$V = E \ell = B \ell v \quad (7.4)$$

Dimana pada bagian atas ujung konduktor pada gambar 8.2(a) mempunyai potensial lebih tinggi daripada ujung bawah. Selama batang konduktor digerakkan, maka timbul gaya magnet pada batang dan gaya magnet selalu diimbangi gaya listrik karena di dalam konduktor tercipta medan listrik. Jadi beda potensial antara kedua ujung konduktor timbul (ada) selama konduktor bergerak dalam medan magnet. Bila arah gerak batang konduktor diubah, maka potensial relatif antara kedua ujung juga berubah.

KISI

Michael Faraday lahir pada tahun 1791 di London, Inggris. Pada usia 12 tahun, Michael menjadi pesuruh toko buku dan ia sangat rajin sehingga ia disuruh magang belajar menjilid buku tanpa membayar. Seorang pelanggan memperhatikan minatnya terhadap sains dan memberinya tiket untuk mengikuti kuliah Sir Humphry Davy. Dia membuat catatan dengan saksama, menjilidnya dan mengirimkannya kepada Davy, yang begitu membuatnya berkesan asisten dalam laboratorium lembaga kerajaan. Dari situlah Michael melakukan penelitian dan menghasilkan penemuan-penemuan yang sangat bermanfaat hingga sekarang.

Timbulnya beda potensial antara kedua ujung konduktor yang disebut sebagai tegangan terinduksi dapat diselidiki dengan menempatkan sepasang rel konduktor pada kedua ujung batang dan antara rel di pasang hambatan R sehingga terbentuk loop tertutup, lihat gambar 7.2(b). Bila batang konduktor digerakkan sejauh x , maka besarnya perubahan fluks magnet sebesar

$$\Phi = BA = B\ell x$$

Dengan menggunakan hukum Faraday

$$\varepsilon = -\frac{d\Phi_m}{dt} = -\frac{d}{dt}(B\ell x) = -B\ell \frac{dx}{dt} = -B\ell v \quad (7.5)$$

Bila pada loop dipasang hambatan R , maka besarnya arus induksi adalah

$$I = \frac{\varepsilon}{R} = \frac{B\ell v}{R} \quad (7.6)$$

Rangkaian pengganti ditunjukkan pada gambar 7.2(c).

2. Hukum Lenz

Faraday telah menunjukkan bahwa GGL dapat ditimbulkan oleh konduktor yang digerakkan dalam medan magnet homogen. Lenz lebih lanjut menegaskan hasil yang diperoleh berdasarkan prinsip Faraday yaitu GGL induksi yang terbentuk pada konduktor yang digerakkan melewati medan magnet homogen cenderung menghasilkan arus induksi sedemikian hingga arus induksi tersebut menghasilkan fluks magnet yang arahnya berlawanan dengan fluks magnet yang lewat loop.

B. GGL Induksi dan Medan Listrik

Medan listrik induksi yang dihasilkan oleh adanya perubahan dalam medan magnet sedikit berbeda dengan medan listrik yang dihasilkan oleh muatan yang stasioner. Perbedaannya adalah bahwa besarnya, ε , GGL induksi dinyatakan dalam medan listrik induksi sebagai

$$\varepsilon = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_m}{dt} \quad (7.7)$$

Medan listrik yang tercantum pada persamaan 7.7 tidak konservatif karena bervariasi dengan waktu, yaitu tergantung pada perubahan medan magnet. Bila medan listrik pada persamaan 7.7 konservatif, maka integral garis pada ruas sebelah kiri persamaan 7.7 nol. Jadi medan listrik induksi berbeda dengan medan listrik muatan stasioner.

Contoh Soal 7.1

Sebuah solenoida panjang dengan lilitan per satuan panjang sebesar n , jari-jarinya R dan dialiri arus $I = I_0 \cos(\omega t)$. Di mana I_0 adalah arus maksimum dan ω adalah frekuensi anguler.

C. Aplikasi Induksi Elektromagnetik

Setelah kalian mempelajari materi Fisika selama kalian sekolah di SMA, apakah di antara kalian menyadari bahwa banyak peralatan yang kita gunakan dalam kehidupan sehari-hari beroperasi berdasarkan hukum-hukum Fisika? Mengapa instalasi listrik untuk

rumah tangga, atau perkantoran menggunakan rangkaian paralel? Atau bahkan kalian bertanya lebih jauh, mesin apakah yang merupakan sumber arus listrik? Berikut ini kalian akan mempelajari peralatan yang biasa menghasilkan arus listrik. Generator dan motor adalah alat-alat yang sangat penting yang operasinya berdasarkan induksi elektromagnetik.

1. Generator dan Motor

Generator arus ac adalah alat untuk mengubah energi mekanik menjadi energi listrik. Secara sederhana generator terdiri dari kumparan yang diputar dalam medan magnet oleh agen dari luar, lihat gambar 7.3. Dalam pembangkit tenaga listrik komersial, energi yang digunakan untuk memutar kumparan diperoleh dari beberapa sumber, misalnya air terjun, air yang jatuh diguna-

kan untuk memutar turbin. Batubara digunakan untuk mendidihkan air dan uapnya digunakan untuk memutar turbin. Dengan berputarnya turbin, fluks magnet yang melewati kumparan turbin berubah, sehingga menghasilkan GGL induksi dan arus pada rangkaian listrik luar. Pada ujung kumparan dipasang dua cincin yang ikut berotasi dengan kumparan. Pada masing-masing cincin dipasang sikat dan sikat tersebut dihubungkan dengan rangkaian luar.

Untuk melihat lebih dekat prinsip dasar generator, marilah kita tinjau kumparan generator yang terdiri dari lilitan sebanyak N dan semua lilitan mempunyai luasan yang sama A , kumparan berotasi dengan kelajuan angular yang konstan ω . Bila pada saat t garis normal bidang kumparan membentuk sudut θ dengan arah medan magnet di mana $\theta = \omega t$, maka besarnya fluks garis gaya magnet yang melewati kumparan menurut persamaan 7.32 adalah

$$\Phi_m = BA \cos \omega t$$

Maka besarnya GGL induksi yang dihasilkan oleh perubahan fluks garis gaya magnet tersebut adalah



Gambar 7.3 Generator arus AC yang terdiri dari dua kutub magnet, kumparan, dua cincin yang dilengkapi sikat dan rangkaian luar

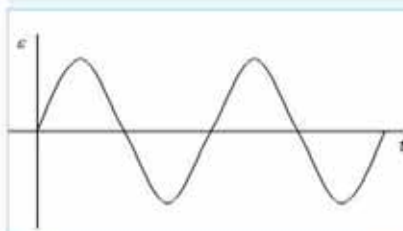
$$\begin{aligned}\varepsilon &= -N \frac{d\Phi_m}{dt} = -NBA \frac{d}{dt}(\cos \omega t) \\ &= NBA\omega \sin(\omega t)\end{aligned}\quad (7.8)$$

Besarnya GGL induksi yang ditunjukkan pada persamaan 7.8 bervariasi secara sinusoidal terhadap waktu. Grafik gaya gerak listrik yang ditunjukkan pada persamaan 7.8 sebagai fungsi waktu ditunjukkan pada gambar 7.4. Harga GGL maksimum pada saat $\theta = \omega t = 90^\circ$, adalah kondisi di mana garis gaya magnet satu bidang dengan kumparan, yaitu

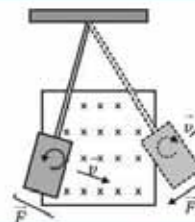
$$\varepsilon = NBA\omega \quad (7.9)$$

Di negara kita frekuensi yang dihasilkan generator dipilih sebesar 50 Hz, maka $\omega = 314 \text{ rad/s}$

Gambar 7.4 menunjukkan grafik GGL sebagai fungsi waktu.



Gambar 7.4 Grafik GGL sebagai fungsi waktu



Gambar 7.5 Keping penghantar berisolasi di sekitar medan magnet yang homogen

Generator DC digunakan untuk satu daya pada baterai beberapa mobil tua. Perbedaan antara generator AC dan DC terletak pada cincin yang dipakai untuk koneksi dengan rangkaian luar. Pada generator DC hanya menggunakan satu cincin pembagi atau komutator yang dihubungkan dengan kumparan yang berotasi.

2. Arus Eddy

GGL induksi dan arus induksi timbul pada loop (rangkain tertutup) bila fluks garis gaya magnet yang melewati loop tersebut berubah terhadap waktu. Bila keping logam digerakkan secara periodik melewati medan magnet yang homogen pada logam tersebut terlihat adanya arus berbentuk lingkaran. Arus yang berbentuk lingkaran ini disebut arus Eddy. Menurut hukum Lenz, arah arus Eddy berlawanan dengan yang menyebabkannya. Jadi, misalkan

keping logam digantungkan pada batang dan disimpangkan, lihat gambar 7.5, pada saat keping bersilasi di sekitar medan magnet yang homogen, arus Eddy menghasilkan medan listrik induksi yang arahnya melawan arah gerak.

D. Persamaan Maxwell

Persamaan Maxwell adalah persamaan yang sangat fundamental untuk gejala kelistrikan dan kemagnetan seperti hukum Newton yang sangat fundamental untuk mekanika. Persamaan Maxwell berikut ini hanya berlaku untuk ruang kosong yaitu jika tidak ada material dielektrik dan magnetik.

Persamaan Maxwell

Nama	Persamaan
Hukum Gauss (listrik statik)	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{A} = q_{enc} / \epsilon_0$
Hukum Gauss (magnet)	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{A} = 0$
Hukum Faraday	$\oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = -\frac{d\Phi_m}{dt}$
Hukum Ampere-Maxwell	$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 i_{enc}$

Hukum Gauss untuk medan listrik mengatakan bahwa fluks garis gaya medan listrik total yang melewati permukaan tertutup sama dengan muatan netto dibagi dengan ϵ_0 .

Hukum Gauss untuk medan magnet menyatakan bahwa fluks total garis gaya magnet yang melewati permukaan tertutup selalu nol.

Hukum Faraday tentang induksi elektromagnetik menyatakan bahwa integral garis medan listrik di sekitar lintasan tertutup sama dengan kelajuan perubahan fluks garis gaya magnet yang melalui luasan yang dibatasi oleh lintasan tertutup tersebut. Sebagai konsekuensi Hukum Faraday adalah timbulnya arus induksi dalam konduktor yang ditempatkan pada medan magnet yang bervariasi terhadap waktu.

Hukum Ampere-Maxwell menyatakan bahwa integral garis dari medan magnet di sekitar lintasan tertutup ditentukan sebagai jumlah arus konduksi yang melalui lintasan tertutup tersebut dan kelajuan perubahan fluks garis gaya medan listrik yang melewati luasan yang dibatasi lintasan tertutup tersebut.

Apabila medan listrik dan medan magnet di suatu titik diketahui, maka besarnya gaya yang dialami oleh muatan q menurut hukum Lorentz dapat ditentukan sebagai

$$F = qE + qvB$$

E. Induktansi

Perubahan fluks magnet terhadap waktu menginduksi GGL dan arus pada konduktor. Bila arus yang mengalir lewat konduktor berubah terhadap waktu, maka perubahan arus tersebut akan menginduksi GGL yang arahnya berlawanan dengan GGL yang menghasilkan arus yang bervariasi tersebut dan konduktor tersebut disebut induktor.

1. Induktansi Diri

Pada waktu kalian mempelajari arus searah, kalian dapat mengamati kuat arus, beda potensial, atau bahkan tahanan yang digunakan dalam rangkaian. Kalau kalian melakukan percobaan tentang hukum Ohm kalian selalu memutar saklar untuk disambung (ditutup) dan untuk diputus (dibuka). Begitu saklar ditutup, jarum galvanometer (multimeter) tidak langsung menunjuk

skala maksimum, $I = \frac{\mathcal{E}}{R}$ bukan?

Pada saat arus mulai mengalir, aliran arus naik sesuai berjalannya waktu sehingga menghasilkan fluks magnet yang juga naik sesuai dengan bertambahnya waktu. Padahal menurut hukum Faraday dan Lenz, kenaikan fluks magnet menyebabkan timbulnya GGL induksi yang arahnya berlawanan dengan GGL yang menghasilkan arus awal. GGL naik dengan naiknya fluks magnet sehingga arus induksi juga naik. Jadi di dalam rangkaian tersebut timbulnya arus induksi disebabkan oleh adanya perubahan arus sebagai fungsi waktu pada saat saklar dihidupkan, maka induksi ini disebut induksi diri, GGL induksi yang dihasilkan disebut GGL induksi diri. Dengan demikian bila arus induksi naik, mengakibatkan naiknya fluks magnet yang arahnya juga berlawanan dengan arah medan magnet yang dihasilkan oleh arus awal yang akan menginduksi arus yang berlawanan dengan arus induksi awal yang berarti searah dengan arus awal. Kondisi ini dalam rangkaian telah terjadi induksi timbal balik.

Karena fluks magnet sebanding dengan medan magnet yang dihasilkan oleh adanya perubahan arus, medan magnet sebanding

dengan arus yang mengalir dalam rangkaian, sedangkan GGL induksi sebanding dengan negatif perubahan fluks magnet, maka dapat dikatakan bahwa GGL induksi juga sebanding dengan perubahan arus dalam sirkuit, maka dapat ditulis

$$\varepsilon = -N \frac{d\Phi_m}{dt} = L \frac{dI}{dt} \quad (7.10)$$

Di mana L adalah konstanta kesebandingan yang disebut induktansi dan biasanya tergantung pada struktur geometri dari bahan. Karena induktansi diri terjadi pada kawat dalam bentuk lilitan bukan pada kawat konektor biasa, maka kawat yang dibentuk lilitan yang biasanya berbentuk kumparan disebut induktor. Besarnya induktansi untuk kumparan yang terdiri dari N lilitan adalah

$$L = \frac{N\Phi_m}{I} \quad (7.11)$$

Dari persamaan 7.10 kita dapat menyatakan

$$L = - \frac{\varepsilon}{\frac{dI}{dt}} \quad (7.12)$$

Persamaan 7.12 menunjukkan hubungan antara induktansi dengan beda potensial antara kedua ujung induktor dan berlaku untuk semua bentuk induktor tanpa meninjau ukuran dan material bahan dasar induktor tersebut. Bisa dikatakan bahwa besarnya induktansi berbanding terbalik dengan perubahan arus per satuan waktu.

Dalam satuan SI, satuan induktansi dalam henry (H), $1 \text{ H} = \frac{1 \text{ V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$

Contoh Soal 7.2

Tentukan besarnya induktansi solenoida yang terdiri dari N lilitan, panjangnya ℓ yang jauh lebih besar dari jari-jarinya dan di dalam solenoida hanya berisi udara!

Penyelesaian:

Besarnya medan magnet di titik tengah sumbu solenoida

$$\text{adalah } B = \mu_0 n I = \mu_0 I \frac{N}{\ell}$$

Besarnya fluks magnet yang melalui setiap lilitan dengan medan magnet searah dengan normal penampang solenoida

$$\text{adalah } \Phi_m = BA = A\mu_0 I \frac{N}{\ell}$$

Maka besarnya induktansi solenoida tersebut adalah

$$L = \frac{N\Phi_m}{I} = \frac{\mu_0 AN^2}{\ell} = \mu_0 n^2 V$$

Dimana n adalah jumlah lilitan solenoida per satuan panjang dan V adalah volume bagian dalam. Maka dapat dikatakan bahwa L tergantung pada bentuk geometri induktor.

Tugas 7.2

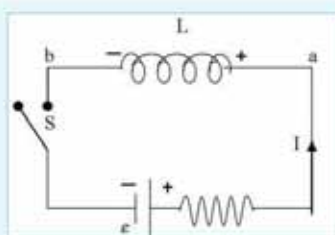
Dengan menggunakan pers di atas hitunglah

- induktansi solenoida yang terdiri dari 400 lilitan, panjangnya 40 cm dan luas penampangnya 5 cm^2
- Hitunglah GGL yang ditimbulkannya bila perubahan arus

per satuan waktu, $\frac{dI}{dt} = 40 \text{ A/s}$!

a. Rangkaian RL

Rangkaian RL adalah rangkaian yang terdiri dari sebuah kumparan yang mempunyai induktansi diri yang dapat menjaga arus dari perubahan yang mendadak. Elemen rangkaian berupa kumparan yang mempunyai induktansi yang besar yang disebut induktor. GGL induksi, \mathcal{E}_L , seolah-olah sebagai baterai tetapi mempunyai polaritas berlawanan dengan polaritas baterai, terbentuk pada induktor bila arus I yang mengalir lewat induktor berubah dengan waktu. Rangkaian RL ditunjukkan pada gambar 7.6. Bila hambatan dalam baterai diabaikan, dan saklar ditutup pada saat $t = 0$, setelah arus mengalir dalam rangkaian maka GGL induksi akan terbentuk pada



Gambar 7.6 Rangkaian RL

induktor yang arahnya berlawanan dengan arah GGL dari baterai yang besarnya dinyatakan sebagai

$$\varepsilon_L = -L \frac{dI}{dt}$$

Karena arus I bertambah besar, maka perubahan arus per satuan waktu $\frac{dI}{dt}$ positif dan arah GGL induksi, ε_L negatif, atau potensial turun dari titik a ke b, lihat gambar 7.6.

Dengan mengaplikasikan Hukum Kirchhoff diperoleh persamaan loop sebagai

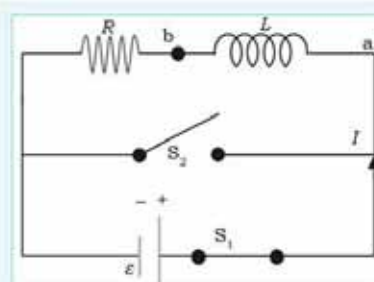
$$\varepsilon - IR - L \frac{dI}{dt} = 0 \quad (7.13)$$

Di mana IR adalah penurunan tegangan antara kedua ujung hambatan.

Persamaan 7.13 disebut sebagai persamaan diferensial, namun kalian tidak perlu menyelesaikannya sendiri, kalian bisa melihat tabel bentuk penyelesaian persamaan diferensial. Dari tabel diperoleh penyelesaian persamaan 7.13 sebagai

$$I = \frac{\varepsilon}{R} (1 - e^{-\frac{Rt}{L}}) \quad (7.14)$$

Di mana I adalah besarnya arus yang mengalir lewat rangkaian setelah saklar ditutup selama t dan konstanta waktu τ didefinisikan sebagai $\tau = \frac{L}{R}$. Pada saat saklar baru dihubungkan $t = 0$, maka besarnya arus yang mengalir nol, karena arus belum mengalir. Tetapi bila saklar telah ditutup dalam waktu yang lama, $t \gg \frac{L}{R}$ maka arus yang



Gambar 7.7 Rangkaian RL dengan dua saklar

mengalir pada rangkaian maksimum, $I = \frac{\varepsilon}{R}$. Dalam keadaan ini arus yang mengalir lewat rangkaian stabil, maka arus induksi tidak terbentuk lagi pada induktor karena perubahan arus per satuan

waktu nol. Jadi pada saat saklar ditutup, arus lambat laun naik terus sampai suatu saat arus mencapai harga maksimum dan menjadi stabil. Misalnya pada rangkaian gambar 7.7 ditambah satu saklar S_2 setelah S_1 ditutup dalam waktu yang lama sehingga arus yang mengalir mencapai maksimum. Bila kemudian saklar S_1 dibuka dan saklar S_2 ditutup, maka sekarang dalam rangkaian tidak terdapat baterai. Dengan menggunakan Hukum Kirchhoff maka diperoleh persamaan.

$$IR + L \frac{dI}{dt} = 0 \quad (7.15)$$

Persamaan 7.15 dapat ditulis menjadi $\frac{dI}{I} = -\frac{R}{L} dt$, dan kalian dapat mengintegrasikan ruas kiri dan kanan pers tersebut. Hasilnya adalah

$$\ln I = -\frac{Rt}{L} + C$$

$$\text{Atau } I = \frac{\varepsilon}{R} e^{-\frac{R}{L}t} = I_0 e^{-\frac{R}{L}t} \quad (7.16)$$

Dari persamaan 7.16 dapat ditunjukkan bahwa pada saat $t = 0$, $I = I_0$ dan pada saat t menuju tak terhingga I menjadi nol. Jadi pada kondisi ini perubahan arus per satuan waktu menurun sehingga GGL induksi yang terbentuk pada induktor positif, yaitu titik a mempunyai potensial yang lebih rendah dari titik b.

Contoh Soal 7.3

Sebuah rangkain RL seperti pada gambar 7.7, $R = 24 \, \Omega$, $L = 48 \, \text{mH}$, dan baterai 12 V. Hitung:

- konstanta waktu $\tau = \frac{L}{R}$ dan
- arus I setelah 2 ms!

Penyelesaian:

- $\tau = \frac{L}{R} = \frac{48 \times 10^{-3} \text{ H}}{24 \, \Omega} = 2 \text{ ms}$
- $t = 2 \text{ ms}$, maka menurut persamaan 7.14 besarnya I adalah $I = (1/2)(1 - e^{-1}) = 0,315 \text{ A}$

b. Energi dalam Medan Magnet

Salah satu manfaat induktor adalah untuk menjaga baterai menghasilkan arus sesaat. Maka baterai harus melakukan kerja untuk menghasilkan arus yang dihambat oleh induktor. Energi yang dihasilkan baterai, sebagian hilang menjadi energi panas pada hambatan, dan sisinya disimpan dalam induktor. Bila pada persamaan 7.13 setiap suku kita kalikan dengan I , diperoleh

$$\varepsilon I = I^2 R + LI \frac{dI}{dt} \quad (7.17)$$

Persamaan 7.17 menunjukkan energi total yang diberikan oleh baterai, IR adalah energi yang hilang menjadi panas pada R , εI

adalah energi yang dihasilkan baterai, dan $LI \frac{dI}{dt}$ adalah energi yang tersimpan dalam induktor. Misalkan laju energi yang tersimpan dalam induktor adalah $\frac{dU_m}{dt}$, maka $\frac{dU_m}{dt} = LI \frac{dI}{dt}$, setelah ruas kiri dan kanan diintegrasikan diperoleh

$$U_m = \frac{1}{2} LI^2 \quad (7.18)$$

Persamaan 7.18 menunjukkan energi yang tersimpan dalam induktor yang dilewati arus I adalah energi magnetik. Dari contoh soal, besarnya L untuk induktor yang berbentuk solenoida yang berisi udara, $L = \mu_0 n^2 A \ell$ dan $B = \mu_0 nI$, maka besarnya energi magnetik yang tersimpan dalam konduktor dapat dituliskan sebagai

$$U_m = \frac{1}{2} LI^2 = \frac{1}{2} \mu_0 n^2 A \ell \frac{B^2}{\mu_0^2 n^2} = \frac{B^2}{2\mu_0} A \ell \quad (7.19)$$

Besarnya energi magnetik yang tersimpan per satuan volume adalah

$$u_m = \frac{B^2}{2\mu_0} \quad (7.20)$$

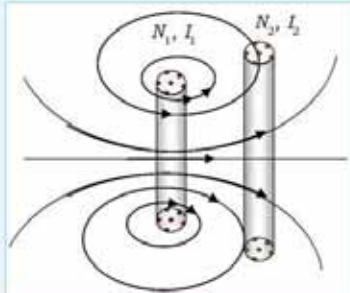
Walaupun persamaan 7.20 dijabarkan berdasarkan energi yang tersimpan dalam solenoida, namun persamaan tersebut berlaku umum selama pada yang tersebut terdapat medan magnet.

Tugas 7.3

Sebuah kabel koaksial yaitu kabel yang terdiri dari dua buah silinder yang konsentris, masing-masing jari-jarinya a dan b dan panjangnya ℓ . Masing-masing konduktor dialiri arus I , hitunglah (a). induktansi diri kabel, (b) Energi magnetik total yang tersimpan dalam kabel!

2. Induktansi Timbal Balik/Silang

Karena arus listrik yang mengalir pada konduktor menghasilkan medan magnet, bila ada rangkaian listrik saling berdekatan, maka pada masing-masing rangkaian mengalami perubahan fluks garis gaya magnet yang juga akan menimbulkan GGL induksi pada masing-masing rangkaian. Peristiwa saling menginduksi GGL ini disebut induksi timbal balik. Untuk memvisualisasi induksi timbal balik ini, kalian perhatikan dua kumparan yang ditunjukkan pada gambar 7.7. Gambar 7.7 menunjukkan dua buah penampang kumparan yang berdekatan. Pada kumparan 1 yang dialiri arus I_1 dan mempunyai lilitan N_1 menghasilkan medan magnet pada kumparan N_2 yang dialiri arus I_2 . Fluks magnet yang dihasilkan kumparan 1 pada kumparan 2 diberi simbol sebagai Φ_{21} , dan kita definisikan induktansi timbal balik pada kumparan 2 terhadap kumparan 1 adalah



Gambar 7.8 Dua buah penampang kumparan yang berdekatan

$$M_{21} = \frac{N_2 \Phi_{21}}{I_1} \quad (7.21)$$

Induktansi timbal balik tergantung pada geometri kedua kumparan, semakin jauh jarak antara kedua kumparan semakin kecil induktansi timbal balik. Bila arus yang mengalir pada kumparan 1 bervariasi dengan waktu, maka besarnya GGL induksi pada kumparan 2 adalah

$$\varepsilon_2 = -N_2 \frac{d\Phi_{21}}{dt} = -M_{21} \frac{dI_1}{dt} \quad (7.22)$$

Dengan cara yang sama, bila I_2 bervariasi terhadap waktu maka besarnya GGL pada kumparan 1 yang disebabkan oleh kumparan 2 adalah

$$\varepsilon_1 = -N_1 \frac{d\Phi_{12}}{dt} = -M_{12} \frac{dI_2}{dt} \quad (7.23)$$

Induktansi timbal balik $M_{12} = M_{21} = M$, maka

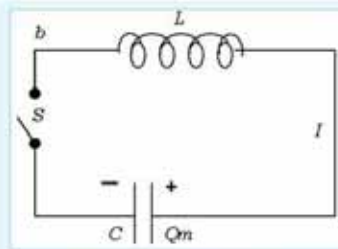
$$\varepsilon_2 = -M \frac{dI_1}{dt} \text{ dan } \varepsilon_1 = -M \frac{dI_2}{dt} \quad (7.24)$$

Tugas 7.4

1. Sebuah solenoida terdiri dari dua lilitan, lilitan primer dan sekunder. Pada lilitan primer terdapat N_1 lilitan dan dialiri arus I , luas penampangnya A dan panjangnya ℓ . Pada lilitan sekunder terdiri dari N_2 lilitan dan dililitkan di atas lilitan primer. Tentukan induktansi timbal balik sistem!
2. Bila $N_1 = 400$ lilitan, $A = 0,005 \text{ m}^2$ dan $\ell = 0,8 \text{ m}$ $N_2 = 10$ lilitan, hitung besarnya induktansi timbal balik!

Osilasi pada Rangkaian LC

Rangkaian LC adalah rangkaian tertutup yang terdiri dari sebuah kapasitor dan sebuah induktor, lihat gambar 7.9. Bila sebuah kumparan dirangkai dengan kapasitor yang bermuatan penuh dan dalam rangkaian tidak mengandung hambatan maka pada sistem tidak ada energi yang hilang dan sistem akan berosilasi selamanya. Setelah saklar ditutup maka terjadilah pelucutan muatan dari kapasitor dan energi listrik yang tersimpan dalam kapasitor mulai berkurang, sebagai hasilnya arus mengalir ke induktor dan energi



Gambar 7.9 Rangkaian LC

mulai tersimpan di induktor sebagai energi magnetik. Proses pelucutan muatan berhenti setelah semua muatan pada kapasitor menjadi nol dan semua energi listrik diubah menjadi energi magnetik yang disimpan di induktor. Tetapi kemudian terjadi proses balik, yaitu terjadi aliran listrik dari induktor ke kapasitor sampai semua energi magnetik pada induktor semuanya dipindah ke kapasitor. Proses pemindahan energi tersebut terjadi bolak-balik.

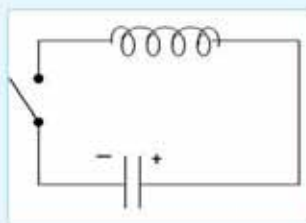
Besarnya energi listrik yang tersimpan dalam kapasitor yang termuati secara penuh adalah

$$U_E = \frac{Q_m^2}{2C}, \text{ sedangkan energi}$$

magne-tik yang tersimpan dalam induktor terinduksi dengan seluruh muatan kapasitor adalah

$$U_m = \frac{1}{2} L I_m^2.$$

Pada rangkaian LC jumlah energi listrik dan magnetik selalu konstan, yaitu



Gambar 7.10 perpindahan energi dari kapasitor ke induktor

$$U = \frac{Q^2}{2C} + \frac{1}{2} L I^2 = \frac{Q_m^2}{2C} = \frac{1}{2} L I_m^2 \quad (7.25)$$

Pada persamaan 7.25 terdapat variabel Q dan I yang bervariasi terhadap waktu jika rangkaian LC ditutup. Maka bila persamaan 9.25 kita differensialkan terhadap t diperoleh

$$\frac{dU}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{Q^2}{2C} + \frac{1}{2} L I^2 \right) = \frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} + L I \frac{dI}{dt} \quad (7.26)$$

Karena tidak ada energi yang hilang, maka energi dalam sistem selalu konstan, persamaan 7.26 nol dan diperoleh

$$\frac{d^2 Q}{dt^2} + \frac{Q}{LC} = 0 \quad (7.27)$$

Coba kalian lihat lagi materi tentang gerak harmonik sederhana, dimana kalian dapat menemukan hubungan antara gaya dengan simpangan yang dinyatakan sebagai $\frac{d^2 x}{dt^2} + \frac{k}{m} x = 0$ yang memberikan penyelesaian simpangan x sebagai $x = A \cos (\omega t + \delta)$ dimana

$\omega^2 = \frac{k}{m}$ dan δ adalah konstanta fase sudut. Persamaan 7.27 bentuknya sama dengan persamaan gerak harmonik dengan x diganti dengan Q .

$$Q = Q_m \cos(\omega t + \delta) \quad (7.28)$$

$$\omega^2 = \frac{1}{LC} \quad (7.29)$$

Di mana Q_m adalah muatan maksimum pada kapasitor, dan frekuensi angular ω hanya tergantung pada induktansi L dan kapasitansi C . Karena muatan bervariasi terhadap waktu, maka arus yang dihasilkan juga bervariasi terhadap waktu, yaitu

$$I = \frac{dQ}{dt} = -\omega Q_m \sin(\omega t + \delta) \quad (7.30)$$

Bila mula-mula kapasitor termuati penuh dan saklar ditutup pada saat $t = 0$, $I = 0$, dan $Q = Q_m$, maka persamaan 7.28 dan 7.30 menjadi

$$Q = Q_m \cos(\omega t) \quad (7.31)$$

$$I = -\omega Q_m \sin(\omega t) = -I_m \sin(\omega t) \quad (7.32)$$

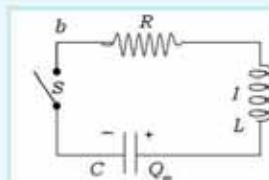
Tugas 7.5

Tunjukkan bahwa energi total pada rangkaian LC pada pers 7.25 dengan memasukkan persamaan 7.31 dan 7.32 adalah

$$U = U_C + U_L = \frac{Q_m^2}{2C} \cos^2 \omega t + \frac{LI_m^2}{2} \sin^2 \omega t \quad (7.33)$$

Persamaan 7.33 menunjukkan bahwa energi sistem berosilasi dari energi listrik ke energi magnetik.

Gambar 7.11 menunjukkan rangkaian seri yang terdiri dari induktor, hambatan, dan kapasitor. Pada saat saklar masih terbuka, kapasitor bermuatan maksimum. Setelah saklar ditutup, maka arus listrik mengalir dalam rangkaian karena kapasitor mengalami pelucutan muatan. Namun dalam rangkaian RLC, energi total



Gambar 7.11 Rangkaian LC

sistem tidak lagi konstan karena arus yang mengalir lewat hambatan akan menimbulkan energi panas pada hambatan yang besarnya per satuan waktu adalah

$$\frac{dU}{dt} = -I^2 R \quad (7.34)$$

Tanda negatif pada persamaan 7.33 menunjukkan bahwa arus berkurang dengan bertambahnya waktu.

Dengan menyamakan persamaan 7.34 dan persamaan 7.26 diperoleh

$$\frac{Q}{C} \frac{dQ}{dt} + LI \frac{dI}{dt} = -I^2 R \quad (7.35)$$

Kalian masih ingat definisi kuat arus listrik bukan? Dengan mengaplikasikan definisi kuat arus listrik

$$I = \frac{dQ}{dt} \text{ dan } \frac{dI}{dt} = \frac{d^2 Q}{dt^2} \text{ pada persamaan 7.35 maka diperoleh}$$

$$L \frac{d^2 Q}{dt^2} + R \frac{dQ}{dt} + \frac{Q}{C} = 0 \quad (7.36)$$

Bentuk persamaan 7.36 mirip dengan persamaan gerak benda yang tergantung pada pegas di dalam zat cair, yaitu

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0. \text{ Di mana } b \text{ adalah faktor kesebandingan gaya}$$

gesek zat cair yang bekerja pada benda. Kedua persamaan tersebut mempunyai bentuk sama, sebagai akibat gaya gesek benda yang bergerak menjadi panas, maka pada rangkaian RLC, hambatan R berfungsi seperti factor gesekan pada benda yang bergerak dalam zat cair. Jadi pada hambatan energi listrik diubah menjadi energi panas. Karena adanya energi yang hilang, maka pada RLC hanya terjadi osilasi teredam. Untuk harga R yang cukup kecil, penyelesaian persamaan 7.36 adalah

$$Q = Q_m e^{-\frac{Rt}{2L}} \cos(\omega_d t) \quad (7.37)$$

$$\text{Di mana } \omega_d = \left(\frac{1}{LC} - \left(\frac{R}{2L} \right)^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7.38)$$

Di mana ω_d adalah frekuensi osilasi muatan yang bergerak

harmonik teredam. Bila $R \ll \sqrt{\frac{4L}{C}}$ harga ω_d mendekati harga

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC}}.$$

F. Rangkaian Arus Bolak-balik

Coba kalian perhatikan lebel yang menempel pada peralatan rumah tangga, misalnya setrika, *rice-cooker*, *refrigerator*, mesin cuci, atau seperangkat peralatan di ruang keluarga seperti radio, TV, tape recorder dan lain-lain. Coba kalian pikirkan mengapa kita tidak menggunakan baterai yang besar saja untuk menghidupkan peralatan-peralatan di atas.

Kreasi Fisika

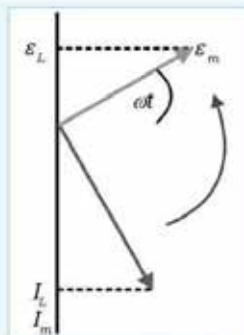
Buatlah tabel mengenai besarnya tegangan yang digunakan dan jenisnya (ac atau dc), daya listrik yang diperlukan, waktu hidupnya (lama waktu alat dapat dipakai dalam keadaan baik), ukurannya, merknya apa? Ada berapa macam perusahaan yang menghasilkan peralatan yang sama?

Setelah kalian menyelidiki hal tentang perabotan rumah tangga, kalian bisa menyimpulkan bahwa sebagian besar perabotan dioperasikan menggunakan sumber tegangan bolak-balik yang dihasilkan oleh generator arus bolak-balik yang diberi simbol \sim

1. Diagram Fasor

Rangkaian arus bolak-balik biasanya terdiri dari induktor, kapasitor, dan hambatan seperti yang telah kita pelajari sebelumnya dan generator arus bolak-balik yang mencatu arus AC. Generator arus AC telah kita bahas sebelumnya, yaitu alat yang menghasilkan GGL induksi yang merupakan fungsi sinusoidal, $\varepsilon = \varepsilon_m \sin \omega t$ dimana ε_m adalah tegangan puncak (maksimum) generator AC atau amplitudo tegangan. Frekuensi angular $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$, f adalah frekuensi dan T adalah periode osilasi muatan. Bila amplitudo tegangan dan frekuensi generator diketahui, demikian juga nilai-

nilai elemen rangkaian diketahui, maka kita dapat menentukan arus bolak-balik. Untuk menganalisis rangkaian yang terdiri dari dua elemen atau lebih kita dapat menggunakan diagram fasor, yaitu konstruksi grafik dari besaran. Fasor adalah vektor yang dapat berotasi. Arus dan tegangan disajikan dalam bentuk vektor yang berotasi. Panjang fasor menggambarkan amplitudo besaran dan proyeksi fasor pada sumbu vertikal menggambarkan nilai besaran sesaat, lihat gambar 7.12. Fasor berotasi berlawanan arah dengan arah jarum jam. Dengan menggunakan diagram fasor, kombinasi arus atau tegangan yang berbeda fase menjadi lebih sederhana. Seperti kita bahas dalam topik osilasi pada rangkaian LC, pada persamaan 9.30, $I = -I_m \sin(\omega t + \delta)$ menunjukkan bahwa I sebagai fungsi sinusoidal dengan kuat arus puncaknya I_m dan kuat arus sesaatnya adalah I .



Gambar 7.12 Diagram fasor tegangan dan arus yang fasenya berbeda

Pada waktu kalian duduk di kelas X kalian telah mempelajari sedikit tentang hubungan antara beberapa besaran pada rangkaian AC, misalnya besaran

$$I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad \text{dan} \quad \varepsilon_{rms} = \frac{\varepsilon_m}{\sqrt{2}} \quad (7.39)$$

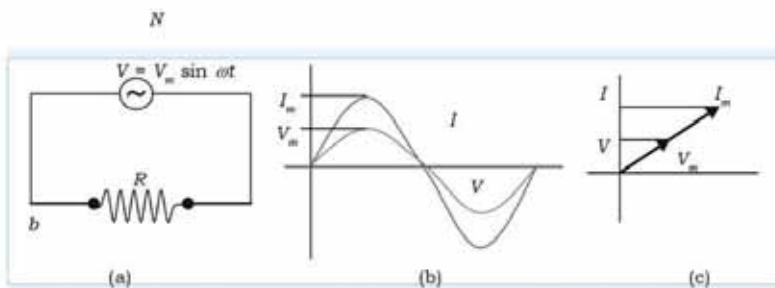
di mana besaran arus rms (I_{rms}) adalah akar dari rerata kuadrat kuat arus.

a. Hambatan dan Reaktansi

Rangkaian arus bolak-balik berbeda dengan rangkaian arus searah karena dicatu oleh sumber tegangan yang berbeda yaitu tegangan bolak-balik dan tegangan searah.

b. Hambatan dalam Rangkaian Arus Bolak-balik

Rangkaian yang sederhana terdiri dari sebuah hambatan R dan sumber tegangan AC, lihat gambar 7.13.



Gambar 7.13 Rangkaian ac dengan R , (b) grafik V dan I vs t , (c) diagram fasor V dan I

Untuk pembahasan rangkaian, kita gunakan simbol tegangan dalam V . Menurut hukum Kirchhoff,

$$V - V_R = 0 \quad (7.40)$$

Di mana V_R adalah penurunan tegangan antara kedua ujung hambatan, yaitu $V_R = V_b - V_a$ dan $V = V_m \sin \omega t$. Maka dari persamaan 7.40 beda tegangan antara kedua ujung hambatan adalah

$$V_R = V_m \sin \omega t \quad (7.41)$$

Besarnya kuat arus yang mengalir lewat hambatan R tersebut adalah

$$I = \frac{V}{R} = \frac{V_m}{R} \sin \omega t = I_m \sin \omega t \quad (7.42)$$

di mana $I_m = \frac{V_m}{R}$ sehingga

$$V_R = I_m R \sin \omega t \quad (7.43)$$

Pada gambar 7.13(c) ditunjukkan bahwa I dan V sefase. Besarnya energi listrik per satuan waktu yang diubah menjadi energi panas dalam hambatan R adalah $P = I^2 R$. Bila pada rangkaian AC dan DC mengalir arus yang sama, I efek pemanasan pada hambatan keduanya sama. Tetapi bila pada hambatan mengalir arus maksimum I_m untuk arus AC efek pemanasannya pada hambatan berbeda untuk arus DC juga sebesar I_m karena arus I_m yang mengalir pada AC hanya dalam waktu sesaat.

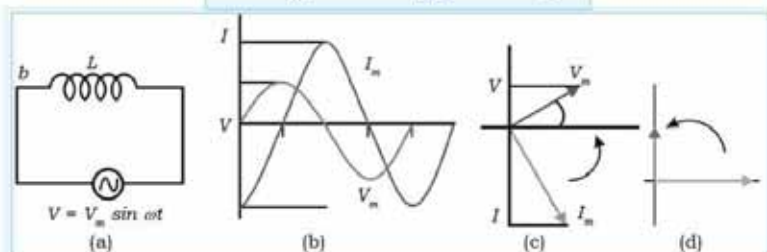
c. Induktor dalam rangkaian arus bolak balik

Pada gambar 7.14 ditunjukkan induktor dengan induktansi L dalam rangkaian AC. Seperti pada rangkaian dengan hambatan, dengan mengaplikasikan hukum Kirchhoff diperoleh

$$V - L \frac{dI}{dt} = 0 \text{ sehingga } \frac{dI}{dt} = \frac{1}{L} V_m \sin \omega t \quad (7.44)$$

Kalian sudah belajar tentang integral fungsi sin atau cos bukan? Lihat buku matematika kalian, maka kalian dapat menentukan arus yang mengalir lewat induktor setiap saat dengan mengintegalkan persamaan 7.44 yang hasilnya adalah

$$I_L = -\frac{V_m}{\omega L} \cos \omega t = \frac{V_m}{\omega L} \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (7.45)$$



Gambar 7.14 (a) Rangkaian AC dengan induktor, (b) Grafik V dan I pada induktor vs t . (c). Diagram fasor tegangan dan kuat arus pada induktor. I tertinggal 90° dari V . (d) Ekuivalen dengan (c) untuk arus dan tegangan sesaat

Dari persamaan 7.45 dapat dikatakan bahwa bila pada induktor diberi tegangan sinusoidal, arus yang mengalir lewat induktor fasenya selalu tertinggal sebesar 90° dari tegangannya. Untuk memudahkan penggambaran fasor, kita boleh memilih arah untuk I_m dan V_m . Sebagai contoh pada gambar 7.14(c) dan (d) ekuivalen yaitu bila arah V_m pada sumbu y maka I_m yang tertinggal 90° dari V_m terletak pada sumbu x . Persamaan 7.45 dapat ditulis kembali

$$I_m = I_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (7.46)$$

$$\text{di mana } I_m = \frac{V_m}{\omega L} = \frac{V_m}{X_L} \quad (7.47)$$

$$\text{dan } X_L = \omega L \quad (7.48)$$

adalah reaktansi induktif yang fungsinya ekuivalen dengan hambatan. Dengan persamaan 7.47 diperoleh

$$V = I_m X_L \sin \omega t \quad (7.49)$$

Persamaan 7.49 dapat difikirkan sebagai hukum Ohm untuk rangkaian induktif.

d. Kapasitor dalam Rangkaian arus Bolak-Balik

Rangkaian AC dengan kapasitor ditunjukkan pada Gambar 7.15. Dengan Hukum Kirchoff untuk gambar 7.15(a) diperoleh

$$V_C = V = V_m \sin \omega t \quad (7.50)$$

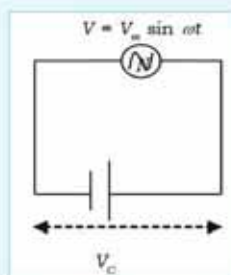
di mana V_C adalah penurunan tegangan sesaat pada kapasitor. Karena $V_C = \frac{Q}{C}$ dan dengan menggunakan persamaan 7.50 diperoleh

$$Q = CV_m \sin \omega t \quad (7.51)$$

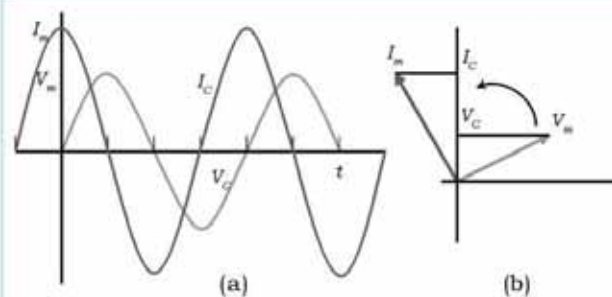
Dengan menggunakan definisi kuat arus kita dapat memperoleh arus sesaat yang mengalir lewat kapasitor sebagai

$$I_C = \frac{dQ}{dt} = CV_m \omega \cos \omega t = CV_m \omega \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad (7.52)$$

Sekarang kalian bandingkan antara persamaan 7.50 dan 7.52 dan bandingkan pula keduanya dengan pernyataan antara tegangan dan arus pada induktor pada topik sebelumnya, apakah ada perbedaan? Pada kedua persamaan, persamaan 7.45 dan 7.52 tersebut hanya berbeda pada tanda konstanta fase sudut. Kalau pada persamaan 7.45 dikatakan arus tertinggal dari tegangan, maka pada kapasitor dikatakan arus mendahului tegangan dengan fase sudut sebesar 90° .



Gambar 7.15 Rangkaian ac dengan kapasitor



Gambar 7.16 (a) Grafik V dan I pada kapasitor sebagai fungsi waktu (b) Diagram fasor untuk rangkaian hanya dengan kapasitor

Dari persamaan 7.52 diperoleh

$$I_m = V_m \omega C = \frac{V_m}{X_C} \quad (7.53)$$

Di mana

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (7.54)$$

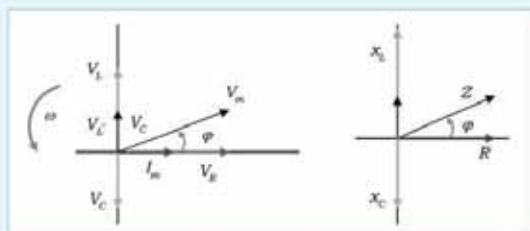
adalah reaktansi kapasitif dan bila persamaan 7.53 dimasukkan ke persamaan 7.50 diperoleh

$$V_c = I_m X_C \sin \omega t \quad (7.55)$$

Dalam satuan SI baik reaktansi kapasitif maupun induktif mempunyai satuan yang sama yaitu ohm.

e. Rangkaian Seri RLC

Pada beberapa topik sebelumnya kalian telah mempelajari satu persatu ke tiga elemen dasar rangkaian arus AC hambatan, kapasitor dan induktor. Sekarang marilah kita diskusikan bagaimana bila ke tiga elemen tersebut disusun secara seri pada sebuah rangkaian tertutup, lihat gambar 7.17.



Gambar 7.17 Diagram fasor rangkaian RLC

Karena semua elemen disusun seri maka arus yang mengalir pada setiap elemen sama besar baik amplitudo maupun fasenya. Tegangan yang dipasang pada rangkaian RLC ini adalah sumber tegangan AC. Karena arus pada ketiganya sama, maka dapat dikatakan bahwa:

1. Pada hambatan, arus dan tegangan sefase. Pada diagram fasor keduanya terletak pada garis (sumbu) yang sama, misalkan keduanya pada sumbu mendatar.

2. Pada induktor, tegangan mendahului arus dengan beda fase 90° . Artinya bila pada diagram fasor arus I_m terletak pada sumbu mendatar, maka tegangan V_L terletak pada sumbu vertikal arah ke atas, karena bila arus diputar berlawanan arah dengan arah jarum jam sebesar 90° , sumbu mendatar arah ke kanan (positif) berubah menjadi sumbu vertikal arah ke atas (positif).
3. Pada kapasitor, tegangan tertinggal arus dengan beda fase 90° . Artinya bila pada diagram fasor arus I_m terletak pada sumbu mendatar maka tegangan V_C terletak pada sumbu vertikal arah ke bawah, karena tegangan tertinggal, maka arah pemutarannya searah dengan arah jarum jam dengan putaran sebesar 90° , sumbu mendatar arah kekanan (positif) berubah menjadi sumbu vertikal arah ke bawah (negatif).

Bila pada diagram fasor, kuat arus diletakkan pada sumbu mendatar, maka tegangan pada R juga terletak pada sumbu mendatar, tegangan pada induktor terletak pada sumbu vertikal arah ke atas, dan tegangan pada C terletak pada sumbu vertikal arah ke bawah, lihat gambar 7.17.

Penurunan tegangan sesaat V , pada masing-masing elemen adalah:

$$V_R = I_m R \sin \omega t = V_{mR} \sin \omega t \quad (7.55)$$

$$V_L = I_m x_L \sin \left(\omega t + \frac{\pi}{2} \right) = V_{mL} \cos \omega t \quad (7.56)$$

$$V_C = I_m x_C \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = -V_{mC} \cos \omega t \quad (7.57)$$

Di mana V_{mR} , V_{mC} , dan V_{mL} masing-masing adalah tegangan puncak pada setiap elemen. Dengan menggunakan diagram fasor pada gambar 7.17, besarnya tegangan total pada rangkaian susunan seri harus dijumlahkan secara vektor walaupun tegangan itu sendiri bukanlah vektor, maka

$$\begin{aligned} V_{m \text{ total}} &= \sqrt{V_{mR}^2 + (V_{mL} - V_{mC})^2} \\ &= \sqrt{I_m^2 R^2 + (I_m x_L - I_m x_C)^2} \\ V_m &= I_m \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} \end{aligned} \quad (7.58)$$

Maka dari persamaan 7.58, nilai maksimum arus yang mengalir pada rangkaian RLC dapat dihitung yaitu

$$I_m = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}} \quad (7.59)$$

$$\text{Di mana } Z = \sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2} \quad (7.60)$$

z adalah impedansi rangkaian RLC seperti yang ditunjukkan pada gambar 7.17(b).

Dan besarnya beda fase sudut φ antara arus dan tegangan adalah

$$\tan \varphi = \frac{x_L - x_C}{R} \quad (7.61)$$

Pada gambar 7.17 ditunjukkan besarnya sudut φ yang menunjukkan beda fase antara tegangan maksimum total dan kuat arus maksimum yang mengalir pada rangkaian RLC. Besarnya sudut φ tergantung pada induktansi dan kapasitansi yang dipasang pada rangkaian.

Tugas 7.6

Tentukan besarnya impedansi pada rangkaian dengan menggunakan persamaan 7.60 bila pada rangkaian hanya dipasang:

hambatan R saja, kapasitor C saja, induktor L saja, R dan C seri, R dan L seri, L dan C seri!

2. Daya pada Rangkaian AC

Bila rangkaian AC hanya terdiri dari induktor dan kapasitor, maka tidak daya yang hilang pada rangkaian tersebut. Seperti pada rangkaian DC, daya sesaat yang dipindahkan dari generator AC ke dalam rangkaian didefinisikan sebagai

$$\begin{aligned} P &= IV = I_m \sin(\omega t - \varphi) V_m \sin \omega t \\ &= I_m V_m \sin \omega t (\sin \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \varphi) \end{aligned} \quad (7.62)$$

$$P = I_m V_m (\sin^2 \omega t \cos \varphi - \cos \omega t \sin \omega t \sin \varphi) \quad (7.63)$$

Harga rerata dari daya P pada persamaan 7.63 adalah

$$\begin{aligned} P_{rata} &= \frac{1}{2} I_m V_m \cos \varphi \\ &= I_{rms} V_{rms} \cos \varphi \end{aligned} \quad (7.64)$$

Di mana I_{rms} dan V_{rms} didefinisikan pada persamaan 7.39 dan disebut faktor daya. Pada rangkaian AC, besarnya kuat arus dan tegangan AC selalu bervariasi dengan waktu dalam bentuk fungsi sinusoidal, maka yang sering terukur pada peralatan adalah harga "rms"-nya sehingga definisi tentang daya juga dinyatakan dalam nilai "rms".

Pada gambar 7.17 dapat dilihat bahwa penurunan tegangan paling besar terjadi pada hambatan R , yaitu $V_R = V_m \cos \varphi = I_m R$ sehingga pers daya rata-rata P_{rata} pada persamaan 7.64 dapat ditulis kembali menjadi

$$\begin{aligned} P_{rata} &= I_{rms} V_{rms} \cos \varphi \\ P_{rata} &= I_{rms}^2 R = I_{rms} V_{rms} \end{aligned} \quad (7.65)$$

Persamaan 7.65 menunjukkan besarnya rerata daya, P_{rata} yang hilang sebagai panas pada hambatan R , yang tampak sama seperti pada rangkaian DC. Persamaan 7.64 menjadi persamaan 7.65 bila yang dipasang pada rangkaian hanya hambatan R saja sebab bila hanya mempunyai R saja $\varphi = 0$

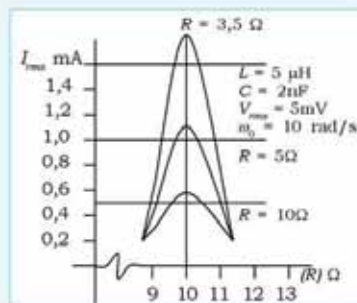
3. Resonansi rangkaian RLC

Resonansi terjadi pada rangkaian RLC bila kuat arusnya mencapai harga puncak. Dari persamaan 7.59 dan 7.60 besarnya arus I_{rms} dapat dituliskan sebagai

$$I_{rms} = \frac{V_{rms}}{Z} = \frac{V_{rms}}{\sqrt{R^2 + (x_L - x_C)^2}} \quad (7.67)$$

Agar terjadi resonansi pada rangkaian RLC, harga pada persamaan 7.67 harus maksimum yang hanya dicapai bila penyebut pada persamaan tersebut nilainya minimum. Nilai penyebut minimum $x_L = x_C$ bila $x_L = \omega_0 L$. Padahal $x_L = \omega_0 L$ dan $x_C = \frac{1}{\omega_0 C}$, jadi resonansi terjadi bila $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$, atau

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (7.68)$$



Gambar 7.18. Grafik I_{rms} vs R untuk beberapa harga R , untuk $f = 10$ Hz terjadi resonansi, maka I maksimum

Jadi, syarat terjadinya resonansi adalah bila frekuensi pada tegangan yang dipasang pada rangkaian harganya sama dengan frekuensi natural dari rangkaian LC itu sendiri. Pada frekuensi resonansi, arus dan tegangan pada rangkaian sefase.

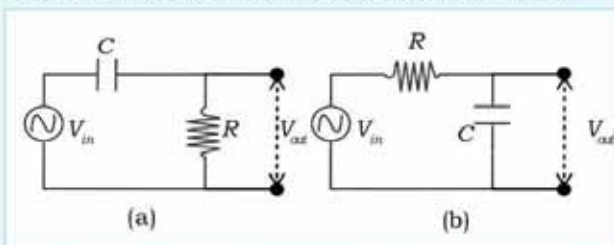
Tugas 7.7

Coba jelaskan mengapa pada saat terjadi resonansi pada rangkaian RLC tegangan dan kuat arusnya sefase!

Gambar 7.18 menunjukkan grafik hubungan antara I_{rms} vs frekuensi angular pada beberapa harga R untuk rangkaian RLC dengan menggunakan persamaan 7.67. Dari gambar ditunjukkan bahwa semakin kecil harga R semakin besar harga I_{rms} . Bila kalian menggunakan pers (7.67), pada saat terjadi resonansi, bila harga R menuju nol bagaimanakah I_{rms} nya?

Brilian

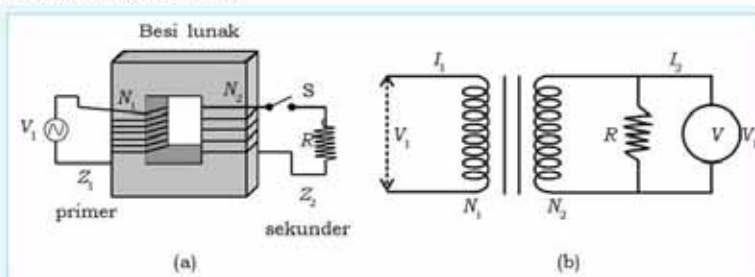
Rangkaian AC yang terdiri dari hambatan R dan kapasitor C biasanya digunakan sebagai rangkaian penyang (filter). (a). Hitunglah impedansi rangkaian RC (b). Bila pada gambar 9.21 menunjukkan skema rangkaian RC untuk penyang (S). frekuensi tinggi, dan (b) frekuensi rendah. Dari gambar tersebut tentukan = untuk kedua jenis filter tersebut!



Gambar 7.19 (a). Rangkaian penyang frekuensi tinggi, (b) Rangkaian penyang frekuensi rendah.

G. Transformator dan Transmisi Daya

Apakah kalian pernah karya wisata ke tempat pembangkit tenaga listrik dengan menggunakan tenaga air seperti di waduk Jatiluhur (Jabar), Karangkates (Jatim) atau Jelog (Jateng)? Pada ketiga waduk tersebut tenaga air yang jatuh dari ketinggian tertentu digunakan untuk memutar turbin pada generator AC sehingga menghasilkan arus AC. Coba kalian cari di internet berapa kilowattjam (KWH) energi listrik dihasilkan oleh masing-masing waduk! Bagaimanakah caranya energi listrik tersebut mengalir ke rumah kalian? Coba kalian buka lagi buku Fisika kelas X untuk menjawab pertanyaan tersebut atau marilah kita perhatikan diskusi di bawah ini.



Gambar 7.20 (a) Transformator ideal yang terdiri dari dua kumparan yang dililitkan pada besi lunak. Tegangan input V_1 dihubungkan dengan kumparan primer dan tegangan output dihubungkan dengan hambatan beban R (b) Diagram rangkaian transformator konvensional

Energi listrik yang dihasilkan oleh pusat pembangkit tenaga listrik harus ditransmisikan, bahkan pada jarak yang jauh untuk penggunaannya. Kalian juga sudah mempelajari pada topik sebelumnya bahwa arus listrik yang mengalir lewat hambatan diubah menjadi panas, maka menyebabkan rugi energi. Karena tenaga listrik ditransmisikan menggunakan kabel yang mempunyai hambatan, dan besarnya energi listrik yang diubah menjadi panas berbanding lurus dengan kuadrat kuat arus dan hambatan, maka transmisi daya listrik pada jarak jauh harus ditransmisikan pada tegangan tinggi untuk mengurangi rugi energi tersebut, misalnya pada tegangan 350 KV. Padahal kalian juga tahu bahwa tegangan listrik yang dipasang di rumah kalian adalah 220 V. Bagaimana caranya mengubah tegangan listrik dari tegangan tinggi ke tegangan rendah? Apakah kalian pernah pergi ke gardu listrik di kota kalian?

Untuk dapat menjawab pertanyaan-pertanyaan di atas marilah kita alat yang disebut dengan transformator yang macamnya ada dua, yaitu step up atau step down. Gambar 7.19 menunjukkan skema sederhana sebuah transformator. Transformator terdiri dari inti besi lunak dan dua buah kumparan, primer dan sekunder, yang dililitkan ke inti besi. Transformator primer yang mempunyai N_1 dihubungkan ke sumber tegangan AC yang merupakan tegangan input. Sedangkan kumparan sekunder mempunyai N_2 lilitan dan dihubungkan dengan beban (hambatan R). Inti besi lunak berguna untuk meningkatkan fluks garis gaya magnetik dan sebagai media agar fluks dari kumparan primer hampir seluruhnya melewati kumparan sekunder. Inti besi lunak juga berguna untuk memperkecil kerugian karena adanya arus histerisis. Transformator pada umumnya mempunyai efisiensi daya dari 90%-99%, tetapi untuk trafo yang ideal, efisiensinya 100%.

Bila rangkaian pada gambar 7.20, saklar pada kumparan sekunder terbuka, maka rangkaian primer (rangkai kumparan primer dengan sumber tegangan AC) hanyalah rangkaian AC dengan induktor (kumparan adalah sebuah induktor) di mana I_m fasenya tertinggal 90° dari tegangan, maka faktor daya = 0. Sehingga rerata daya yang diberikan oleh sumber tegangan AC terhadap kumparan adalah nol. Berdasarkan hukum Faraday, besarnya tegangan induksi pada kumparan adalah

$$V_1 = -N_1 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (7.69)$$

Di mana Φ_m adalah fluks magnetik yang melewati setiap lilitan. Bila tidak ada fluks magnetik yang hilang, maka fluks magnetik yang melewati setiap lilitan pada kumparan sekunder sama dengan pada kumparan primer. Maka besarnya tegangan induksi pada kumparan sekunder adalah

$$V_2 = -N_2 \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (7.70)$$

Dari persamaan 7.69 dan 7.70 diperoleh hubungan

$$V_2 = \frac{N_2}{N_1} V_1 \quad (7.71)$$

Dari persamaan 7.71 dapat dikatakan bahwa perbandingan tegangan pada transformator sebanding dengan perbandingan lilitannya. Jika tegangan primer lebih besar daripada tegangan sekunder ($V_1 > V_2$). Transformator seperti ini disebut transformator penurun tegangan (transformator step-down)

Akan tetapi jika tegangan primer lebih kecil daripada tegangan sekunder ($v_1 < v_2$) disebut transformator peningkat tegangan (transformator step-up)

Bila saklar pada rangkaian sekunder ditutup, maka rangkaian sekunder merupakan rangkaian AC dengan hambatan R , sehingga arus induksi sefase dengan tegangan induksi, lihat gambar 7.22(b). Daya yang dicatukan ke rangkaian sekunder berasal dari sumber tegangan AC. Pada transformator yang ideal, daya pada kumparan primer ditransfer seluruhnya ke kumparan sekunder, maka

$$I_1 V_1 = I_2 V_2 \quad (7.72)$$

Pada rangkaian sekunder harga hambatan R menentukan harga arus induksi pada kumparan sekunder, $I_2 = \frac{V_2}{R}$, dan pada rangkaian primer, $I_1 = \frac{V_1}{R_{eq}}$, maka dengan menggunakan persamaan 7.71 dan 7.72 diperoleh

$$R_{eq} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 R \quad (7.73)$$

Dari diskusi di atas kita dapat memperhitungkan besarnya beban R yang harus dipilih agar transfer daya dapat dimaksimumkan.

Dari diskusi di atas kalian dapat memahami bagaimana energi listrik ditransfer dari pusat pembangkit tenaga listrik ke rumah-rumah. Pada umumnya, pusat pembangkit tenaga listrik, tegangan dinaikkan sampai sekitar 230 kV, kemudian dialirkan ke pusat pembagi energi di gardu induk pada setiap kota dan tegangan diturunkan sampai 20 kV dan akhirnya tegangan diturunkan menjadi 110-220 V dengan menggunakan tiang-tiang listrik ke pemakai.

Contoh Soal 7.4

Sebuah sumber tegangan AC (generator AC) menghasilkan $I_{rms} = 10$ A pada tegangan 400 V. Kemudian tegangan dinaikkan dengan transformator step up sampai tegangannya menjadi 5000 V dan ditransmisikan ke jarak jauh dengan menggunakan kabel panjang yang mempunyai hambatan total sebesar 30Ω .

Tentukan:

- Energi yang hilang pada saat tegangan dinaikkan!
- Berapa persen energi awal yang hilang bila arus listrik ditransmisikan pada tegangan 400 V?

Penyelesaian:

Dari soal di atas diketahui: $I_1 = I_{rms} = 10 \text{ A}$, $V_1 = 400 \text{ V}$, $V_2 = 5000 \text{ V}$.

Ditanya:

- $P_R = I_2^2 R$ untuk $= 5000 \text{ V}$?
- $P_R = I_2^2 R$ untuk $= 400 \text{ V}$?

Jawab:

Untuk menentukan energi yang hilang, maka kita harus menentukan arus yang dihasilkan pada rangkaian sekunder yang berupa kabel yang panjang yang beban hambatannya sebesar 25Ω . Dengan menggunakan persamaan 7.72 diperoleh

$$I_2 = \frac{I_1 V_1}{V_2} = \frac{(10 \text{ A})(400 \text{ V})}{5000 \text{ V}} = 0,8 \text{ A}, \text{ maka besarnya energi yang}$$

hilang selama energi listrik ditransmisikan lewat kabel panjang adalah $P_{\text{hilang}} = P_R = I_2^2 R = 16 \text{ W}$. Besarnya output sensor AC yang kita gunakan adalah $P = IV = 4000 \text{ W}$, maka persentase

energi yang hilang adalah $P_{\text{hilang}} (\%) = \frac{16 \text{ W}}{4000 \text{ W}} \times 100\% = 0,4\%$

- Energi yang hilang bila daya ditransmisikan pada tegangan 400V adalah $P_{\text{hilang}} = P_R = I_1^2 R = (10 \text{ A})^2 \times 30 \Omega = 3000 \text{ W}$, maka persentase energi yang hilang adalah

$$P_{\text{hilang}} (\%) = \frac{3000 \text{ W}}{4000 \text{ W}} \times 100\% = 75\%$$

Dari contoh ini kalian dapat memahami mengapa daya listrik ditransmisikan pada tegangan tinggi walaupun kadang-kadang ditentang oleh masyarakat yang rumahnya dekat dengan gardu yang mentransmisikan tegangan tinggi.

Uji Kompetensi

- A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf *a*, *b*, *c*, *d*, atau *e*! Kerjakan di buku tugas!

1. Sebuah kumparan memiliki 1000 lilitan, dan induktansi dirinya berharga 0,4 henry. Bila pada kumparan tersebut terjadi perubahan kuat arus dari 10 A menjadi 2 A selama 0,1 sekon, maka GGL induksi dari ujung – ujung kumparan tersebut adalah

a. 8 volt

d. 64 volt

b. 16 volt

e. 80 volt

c. 32 volt

2. Sepotong kawat penghantar yang panjangnya 1 digerakkan memotong gerak tegak lurus suatu medan magnet B , sehingga menimbulkan GGL induksi ϵ . Jika kecepatan gerak kawat dinaikkan 2 kali semula dengan arah tetap dan panjang kawat diubah menjadi $\frac{1}{4}$ nya maka ggl induksinya menjadi

a. 0.25 €

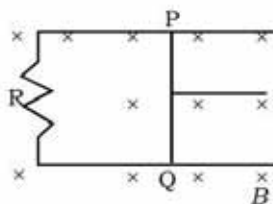
d. 3 e

b. 0,50 ε

e. 4ε

c. 2 f

3. Rangkaian kawat ABCD dengan hambatan R terletak dalam medan magnet berarah masuk bidang kertas dengan besar induksi magnetik B . Daya yang diperlukan untuk menggeser kawat lurus PQ dengan panjang L ke kanan dengan kelajuan y adalah . . .

a. BLv

d. $\frac{B^2 L^2 v}{R}$

b. $\frac{BLv^2}{R}$

e. $\frac{B^2 L^2 v^2}{R}$

$$c. \quad \frac{B^2 L v^2}{R}$$

4. Sebuah toroida ideal, hampa mempunyai 1000 lilitan dan jari-jari rata-ratanya 0,5 m, kumparan yang terdiri dari 5 lilitan dililitkan pada toroida tersebut. Penampang lintang toroida $2 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ dan arus listrik pada kawat toroida berubah dari 7 A menjadi 9 A dalam satu detik, maka di dalam kumparan timbul ggl imbas yang besarnya (dalam mV)
 - a. 4
 - b. 8
 - c. 12
 - d. 28
 - e. 36
5. Untuk menaikkan GGL maksimum suatu generator AC agar menjadi 4 kali semula, dapat dilakukan dengan cara
 - a. jumlah lilitan dilipatgandakan dan periode putar menjadi $\frac{1}{2}$ kali mula-mula
 - b. kecepatan sudut dan luas penampang kumparan dijadikan $\frac{1}{2}$ kalinya
 - c. induksi magnet dan jumlah lilitan dijadikan 4 kali semula
 - d. luas penampang dan periode putar dijadikan 2 kali semula
 - e. penampang dan periode dijadikan $\frac{1}{2}$ kali semula
6. Sebuah dinamo arus bolak-balik yang diputar dengan kecepatan 450 putaran tiap menit dapat menghasilkan tegangan maksimum 50 volt. Agar dinamo menghasilkan tegangan sebesar 150 volt, maka
 - a. jumlah lilitan 2 kali semula, kecepatan 900 putaran per menit
 - b. jumlah lilitan sama, kecepatan 375 putaran per menit
 - c. jumlah lilitan 2 kali semula, kecepatan 375 putaran per menit
 - d. jumlah lilitan sama, kecepatan 1350 putaran per menit
 - e. jumlah lilitan 3 kali, kecepatan 27500 putaran per menit
7. Agar GGL maksimum yang timbul pada generator menjadi 4 kali dapat dilakukan
 - 1) jumlah lilitan dan frekuensi putar dijadikan $2x$ semula
 - 2) jumlah lilitan dijadikan $\frac{1}{4} x$ sedang frekuensi tetap.
 - 3) luas penampang kumparan dijadikan $8x$ dan frekuensinya dijadikan $\frac{1}{2} x$
 - 4) jumlah lilitan, luas penampang dan frekuensi putar dijadikan $4x$

Pernyataan yang benar adalah . . .

- a. 1,2 dan 3
 - b. 1 dan 3
 - c. 2 dan 4
 - d. 4 saja
 - e. semua benar
8. Hambatan 1000 Ω , kumparan kapasitor 0,2 mikrofarad dirangkakan seri dan dihubungkan dengan sumber tegangan bolak-balik yang frekuensi sudutnya 5000 rad/s. Hasil impedansi rangkaian tersebut mendekati . . .
- a. 100 Ω
 - b. 500 Ω
 - c. 1600 Ω
 - d. 1800 Ω
 - e. 2600 Ω
9. Gambar di bawah ini adalah sumber arus listrik bolak balik dengan frekuensi 25 Hz
- $$C = \frac{62,5}{\pi} \mu F, R = 240 \Omega \text{ dan } V_A - V_B = 200 \text{ Volt}$$
- kuat arus yang melewati AB mendekati . . .
- a. 1 ampere
 - b. 0,75 ampere
 - c. 0,5 ampere
 - d. 0,2 ampere
 - e. 0,1 ampere
10. Suatu rangkaian seri RLC dihubungkan dengan sumber tegangan $V = 100\sqrt{2} \sin 100t$ Volt. Besar hambatan murni 600 Ω , induktansi diri kumparan 2 henry dan kapasitas kapasitor 10 μF . Daya hubungan tersebut adalah . . .
- a. 6 Watt
 - b. 8 Watt
 - c. 10 Watt
 - d. 12 Watt
 - e. 14 Watt

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Sebuah gelung berbentuk empat persegi panjang berukuran $5,0 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ terletak tegak lurus pada medan homogen sebesar 10^{-3} T .
 - a. Berapakah fluks yang mengalir melalui gelung itu?
 - b. Bila medan magnetik menjadi nol dalam waktu 3 s, berapakah beda potensial yang diinduksi pada ujung-ujung gelung ?
2. Trafo memiliki 150 lilitan primer dan 30 lilitan sekunder. Trafo tersebut akan digunakan untuk TV dari 220 Volt 60 Watt. Jika efisiensi trafo 90%, berapakah arus pada kumparan primernya?

3. Sebuah amperemeter arus bolak-balik yang dipasang seri dengan suatu rangkaian arus bolak-balik menunjukkan arus sebesar 10A. Sebuah voltmeter yang dipasang paralel dengan rangkaian itu menunjukkan tegangan sebesar 60 V.
 - a. Berapakah arus maksimum rangkaian itu?
 - b. Berapakah tegangan maksimum rangkaian itu?
4. Kuat arus listrik pada rangkaian arus bolak-balik dinyatakan dengan persamaan: $I = 10 \sin \pi(120t - \frac{1}{2})$ miliampere. Dari persamaan tersebut, tentukan:
 - a. Arus maksimum pada rangkaian!
 - b. Frekuensi linier sumbernya!
 - c. Apakah arti persamaan tersebut?
5. Pada sebuah rangkaian R-L seri dengan induktansi diri $L = 0,5$ henry dan persamaan arusnya ditunjukkan oleh: $i = 2 \sin (120t + 1/3\pi)$ ampere. Dari data tersebut di atas tentukanlah:
 - a. Pergeseran fase arus terhadap tegangan!
 - b. Reaktansi induktifnya!
 - c. Hambatan ohm (R)!
 - d. Persamaan tegangannya!

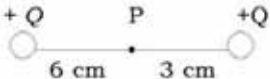
Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Latihan Ulangan Semester I

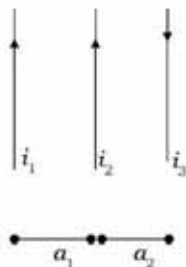
A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

1. Gelombang stasioner akan terjadi bila ada dua gelombang menjalar dalam arah berlawanan dan memiliki . . .
 - a. amplitudo dan frekuensi sama
 - b. amplitudo dan frekuensi berbeda
 - c. amplitudo sama
 - d. frekuensi sama
 - e. fase sama
2. Suatu gelombang merambat dengan persamaan $y = 8 \sin (2\pi t - 0,2\pi x)$, x dalam meter t dalam sekon. Besar frekuensi dan panjang gelombangnya adalah . . .
 - a. 1 Hz dan 10 m
 - b. 2 Hz dan 10 m
 - c. 3 Hz dan 10 m
 - d. 1 Hz dan 2,5 m
 - e. 1 Hz dan 0,4 m
3. Suatu persamaan gelombang stasioner : $y = 0,2 \cos (5\pi x) \sin (10\pi t)$ (y dan x dalam meter dan t dalam sekon). Jarak antara perut dan simpul yang berurutan pada gelombang ini adalah . . .
 - a. 0,1 m
 - b. 0,4 m
 - c. 0,4
 - d. 0,2 m
 - e. 5 m
4. Kecepatan gelombang trasversal dalam dawai :
 1. Berbanding lurus dengan akar gaya tegangan dawai.
 2. Berbanding terbalik dengan akar masa persatuan panjang dawai.
 3. Berbanding terbalik dengan panjang gelombang dawai.
 4. Berbanding terbalik dengan frekuensi gelombang dalam dawai.Pernyataan yang benar adalah . . .
 - a. 1, 2, 3, dan 4
 - b. 1, 2 dan 3
 - c. 1 dan 2
 - d. 2 dan 4
 - e. 4 saja
5. Celah tunggal dengan lebar 0.1mm disinari cahaya dengan panjang gelombang $4,0 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Pola difraksi yang terjadi ditangkap oleh layar pada jarak 60 cm dari celah. Jarak antara garis gelap dari garis terang pusat adalah . . .

- a. 0,72 mm
 - b. 4,8 mm
 - c. 7,2 mm
 - d. 12 mm
 - e. 16 mm
6. Diketahui sudut kritis permata di udara adalah 34° . Jika indeks bias permata 1.77, maka sudut polarisasi permata adalah
- a. 30°
 - b. 45
 - c. 50
 - d. 60
 - e. 75
7. Sebuah kisi yang memiliki 3000 garis tiap cm, digunakan untuk menentukan panjang gelombang cahaya. Sudut antara garis pusat dan garis pada orde 1 adalah 8° ($\sin 8^\circ = 0,140$). Panjang gelombang tersebut adalah
- a. $2,70 \times 10$ m
 - b. $3,70 \times 10$ m
 - c. $3,70 \times 10$ m
 - d. $4,63 \times 10$ m
 - e. $3,75 \times 10$ m
8. Menaikkan tinggi nada suatu dawai dapat dilakukan dengan cara
- a. dawai diperpanjang
 - b. dawai diperpendek
 - c. penampang dawai diperbesar
 - d. tegangan dawai diperkecil
 - e. dawai diganti dengan dawai yang massa tiap satuan panjangnya lebih besar
9. Seutas dawai dengan panjang 2m, massanya $1,6 \times 10^{-2}$ kg, ditegangkan dengan gaya 10 N. Jika dawai dipetik, menghasilkan nada dasar dengan frekuensi
- a. 25 Hz
 - b. 40 Hz
 - c. $50/4$ Hz
 - d. $25/4$ Hz
 - e. 100 Hz
10. Taraf intensitas bunyi pada suatu jendela terbuka yang luasnya 2 m^2 adalah 80 dB. Jika intensitas ambang bunyi 10 watt/m^2 , maka daya-daya akustik yang masuk melalui jendela tersebut adalah
- a. 2×10 watt
 - b. 2×10 watt
 - c. 2×10 watt
 - d. 2×10 watt
 - e. 2×10 watt

11. Dua buah muatan listrik masing-masing besarnya Q_1 dan Q_2 . Jarak kedua muatan r dan k adalah tetapan kelistrikan yang besarnya $9 \cdot 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$. Besarnya gaya tarik atau tolak antara Q_1 dan Q_2 adalah
- berbanding lurus dengan r , Q_1 dan Q_2
 - berbanding lurus dengan r^2 dan berbanding terbalik dengan Q_1
 - berbanding lurus dengan Q_1 dan berbanding terbalik dengan r^2
 - berbanding lurus dengan Q_1 dan berbanding terbalik dengan r
 - berbanding terbalik dengan r dan berbanding terbalik dengan Q_1
12. Dua partikel A dan B masing-masing bermuatan $+20 \mu\text{C}$ dan $+45 \mu\text{C}$. Terpisah dengan jarak 15 cm. Jika C adalah titik yang terletak antara A dan B sehingga medan di C sama dengan 0, maka letak C dari A adalah
- 2 cm
 - 3 cm
 - 4 cm
 - 6 cm
 - 9 cm
13. Dua muatan listrik masing-masing $4 \mu\text{C}$ dan $9 \mu\text{C}$ dan 9 cm satu sama lain. Letak suatu titik yang mempunyai kuat medan listrik = 0 adalah
- di tengah-tengah kedua muatan
 - 3,6 cm dari muatan I dan 5,4 cm dari muatan II
 - 5,4 cm dari muatan I dan 3,6 cm dari muatan II
 - 3 cm dari muatan I dan 6 cm dari muatan II
 - 6 cm dari muatan I dan 3 cm dari muatan II
14. Perhatikan gambar di samping.
 $Q_1 = Q_2 = 10 \mu\text{C}$ dan konstanta $k = 9 \times 10^9 \text{ N.m}^2/\text{C}^2$, maka besar dan arah kuat medan listrik di titik P adalah
- 
- $7,5 \times 10^3 \text{ N/C}$ menuju Q_1
 - $7,5 \times 10^3 \text{ N/C}$ menuju Q_2
 - $5,5 \times 10^3 \text{ N/C}$ menuju Q_1
 - $2,5 \times 10^3 \text{ N/C}$ menuju Q_2
 - $2,5 \times 10^3 \text{ N/C}$ menuju Q_2
15. Sebuah bola konduktor berongga bermuatan listrik positif jari-jarinya 10 cm pada titik yang terletak sejauh 15 cm dari pusat bola mempunyai kuat medan $2 \cdot 10^3 \text{ N/C}$, maka kuat medan di permukaan bola dan besar muatan listriknya masing-masing adalah

- a. 225 N/C dan 5×10^{11} C d. 4500 N/C dan 5×10^{-9} C
 b. 450 N/C dan 5×10^{11} C e. 4500 N/C dan 5×10^9 C
 c. 2250 N/C dan 5×10^9 C
16. Titik P berjarak 2 meter dari muatan $+8 \mu\text{C}$, 3 meter terhadap muatan $-6 \mu\text{C}$ dan 4 meter terhadap muatan $-16 \mu\text{C}$. Potensial listrik di titik P adalah . . .
 a. 2×10^3 volt d. -18×10^3 volt
 b. -4×10^3 volt e. 18×10^3 volt
 c. 4×10^3 volt
17. Sebuah bola konduktor memiliki rapat muatan permukaan $20 \mu\text{C}/\text{m}^2$ dan diameter 16 cm. Potensial di titik yang berjarak 10 cm dari pusat bola adalah . . .
 a. $512\pi \times 10^3$ V d. $51,2\pi \times 10^3$ V
 b. $460,8\pi \times 10^3$ V e. $46,6\pi \times 10^3$ V
 c. $342,6\pi \times 10^3$ V
18. Tiga buah kapasitor C_1 , C_2 dan C_3 dengan kapasitor masing-masing $2 \mu\text{F}$, $3 \mu\text{F}$ dan $6 \mu\text{F}$ disusun seri, kemudian dihubungkan ke sumber tegangan 6 volt. Besar muatan yang tersimpan pada kapasitor C_2 adalah . . .
 a. $0,6 \mu\text{C}$ d. $12 \mu\text{C}$
 b. $6 \mu\text{C}$ e. $2,4 \mu\text{C}$
 c. $1,2 \mu\text{C}$
19. Sebutir debu bermuatan listrik $4 \mu\text{C}$ dan bermassa 10 mg dapat terapung bebas didalam medan listrik, jika $g = 10 \text{ m/s}^2$, besarnya kuat medan listrik yang mempengaruhi muatan tersebut adalah . . .
 a. 5×10^3 V.m d. 25×10^3 V.m
 b. 20×10^3 V.m e. 15×10^3 V.m
 c. 10×10^3 V.m
20. Tiga kawat lurus dipasang sejajar dengan $I_1 > I_2 > I_3$ dan $a_1 = a_2 = a_3$, arah arus seperti gambar. Gaya magnetik total pada I_2 adalah . . .



$$c. \frac{\mu_0 I_2 (I_1 + I_3)}{2\pi \cdot a^2}$$

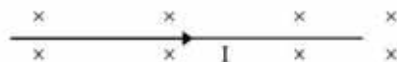
$$d. \frac{\mu_0 I_2 (I_1 + I_3)}{2\pi \cdot a}$$

$$e. \frac{\mu_0 I_2 (I_1 + I_3)}{4\pi \cdot a^2}$$

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Gelombang merambat dari A dan B dengan amplitudo 2 cm dan periode 0,4 detik. Jarak antara A dan B adalah 1,6 cm. Jika cepat rambat gelombang 5 m/s, hitung beda fase antara A dan B!
2. Seutas tali panjang 2 meter, massanya 10 gram dan diberi tegangan 0,5 N. Jika digetarkan pada salah satu ujungnya hingga gelombang berjalan, maka hitunglah kecepatan gelombang tersebut!
3. Dua celah dengan jarak 0,2 mm disinari cahaya dengan panjang gelombang 5×10^{-4} mm. Garis terang ke-3 terletak 7,5 mm dari garis terang pusat pada layar yang jaraknya 1,2 m dari celah. Hitung jarak antara garis terang ke-2 dengan garis gelap ke-4 yang terdekat!
4. Jarak A ke sumber bunyi adalah $\frac{2}{3}$ kali jarak B ke sumber bunyi tersebut. Jika intensitas bunyi yang didengar A adalah I , maka hitung intensitas yang didengar B!
5. Sumber bunyi memancarkan bunyi berfrekuensi 600 Hz saling mendekat dengan pendengar, masing-masing kecepatan pendengar dan sumber adalah 40 m/s dan 60 m/s. Jika kecepatan bunyi di udara 340 m/s, maka hitung frekuensi bunyi yang diterima pendengar!
6. Segitiga sama sisi dengan panjang sisi 30 cm terletak di udara. Pada titik-titik sudut A, B dan C berturut-turut terdapat muatan listrik 2×10^{-6} C. Hitung besarnya gaya Coulomb di titik C!

7. Tiga buah muatan masing-masing $q_1 = q_3 = 8\mu\text{C}$, $q_2 = 12\mu\text{C}$ terletak dalam satu garis lurus, jarak $q_1 - q_2 = 30\text{ cm}$, $q_2 - q_3 = 60\text{ cm}$, $q_3 - q_2 = 90\text{ cm}$. Hitung besar kuat medan listrik di q_2 !
8. Sebuah bola bermuatan listrik $+1000\text{ pc}$ dan berada di udara dan berdiameter 20 cm . Hitung besar potensial di suatu titik dalam bola dan berjarak 5 cm terhadap pusat bola!
9. Sebuah kapasitor $50\mu\text{F}$ dihubungkan dengan sumber tegangan hingga dapat menyimpan energi $0,36\text{ joule}$. Hitunglah muatan yang tersimpan dalam kapasitor tersebut!
10. Kawat lurus berarus listrik 3 A , melewati medan magnetik $\dots \dots \times 10^{-2}\text{ tesla}$ dengan arah seperti gambar di bawah. Jika panjang kawat dalam medan 50 cm , maka hitung besar dan arah gaya magnetik yang dialami kawat berarus tersebut!



Bab VIII

Radiasi Benda Hitam

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini kalian dapat menganalisis secara kualitatif gejala kuantum yang mencakup hakikat dan sifat – sifat radiasi benda hitam serta penerapannya

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Suhu
2. Panjang gelombang
3. Energi

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

1. Hipotesa planck
2. Bencana ultraviolet dan hipotesa planck
3. Efek fotolistrik
4. Efek compton

Teori relativitas khusus yang diusulkan telah memberikan solusi permasalahan yang muncul dalam fisika klasik untuk menerangkan partikel atau benda yang mempunyai kelajuan mendekati kelajuan cahaya ($c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$). Ada beberapa masalah lain yang dihadapi pada fisika klasik, yaitu ketidaksesuaian antara teori dan hasil eksperimen. Sejak awal abad ke-20, para ahli telah berusaha untuk menggali konsep atom yang lebih mendalam untuk dapat menjelaskan berbagai fenomena atomik yang berkaitan dengan teori fisika klasik namun belum berhasil.

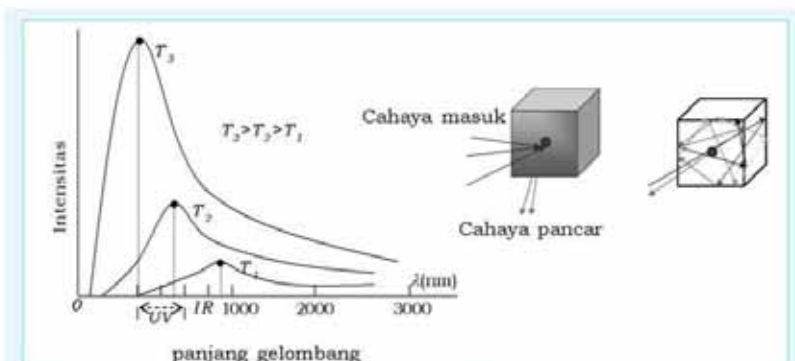
Dalam tahun 1900–1930, dimulailah sejarah perkembangan ilmu fisika baru, yaitu diusulkannya hipotesa yang berdasarkan pada pendekatan nonklasik (tidak menggunakan konsep Newtonian secara penuh). Dalam teori ini cahaya tidak hanya bersifat sebagai gelombang yang ditunjukkan oleh berbagai fenomena fisis seperti pemantulan, pembiasan, interferensi, polarisasi dan difraksi namun cahaya dipandang sebagai partikel yang terkuantisasi. Artinya bahwa energi cahaya tidak lagi bersifat kontinu semata namun lebih bersifat diskrit. Sifat diskrit berarti bahwa cahaya sebagai bentuk partikel. Hipotesa ini yang membawa pada perkembangan ilmu fisika yang sangat dahsyat pengaruhnya dan merupakan cabang ilmu fisika baru yang disebut fisika kuantum atau mekanika kuantum.

A. Pergeseran Wien

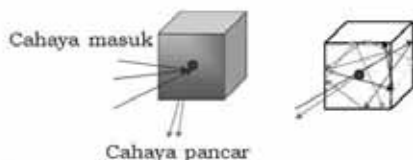
Satu masalah yang dihadapi pada abad ke-19 adalah bagaimana menjelaskan terjadinya spektrum radiasi yang dipancarkan oleh benda yang lebih panas. (Pernahkah kalian mengamati nyala api yang dihasilkan dari kompor minyak dan gas?). Pemancaran energi panas ke lingkungan disebut radiasi termal dan besarnya intensitas yang dipancarkan berbanding lurus dengan suhu kelvin pangkat empat $I \propto T^4$. Karena suhu benda selalu di atas nol suhu mutlak, maka semua benda memancarkan radiasi termal.

Pada suhu normal, radiasi ini berada pada daerah inframerah, sehingga tidak nampak oleh mata kita. Pada suhu kira-kira 1000 K, sebuah benda memancarkan radiasi dalam daerah panjang gelombang cahaya tampak dan mempunyai cahaya warna kemerahan. Contoh: pada kompor listrik dimana kumparannya atau tungkunya nampak kemerahan. Jika suhu benda bertambah, maka radiasi dan warna bergeser ke panjang gelombang yang lebih pendek, kuning, oranye. Di atas suhu 2000 K, cahaya benda tampak berwarna putih kekuningan. Contoh: warna cahaya yang dipancarkan dari filamen lampu bolam.

Diskusi di atas menunjukkan bahwa, walaupun kita hanya melihat salah satu warna khusus, secara umum benda memancarkan cahaya dengan spektrum kontinu pada semua suhu, lihat gambar 8.1. Kurva yang ditunjukkan tidak termasuk benda hitam. Benda hitam dianggap sebagai benda yang mempunyai sifat menyerap (*absorbs*) dan memancarkan (*emisi*) semua radiasi yang mengenai pada benda tersebut.



Gambar 8.1 Tampak bahwa semakin besar suhu benda panjang gelombang yang dipancarkan semakin kecil.



Gambar 8.2 Radiasi benda hitam dengan pendekatan lubang kecil

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan sosial** kalian, lakukanlah kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Kalian bisa mengetahui kualitas kompor dengan nyala api yang biru dan merah. Menurut kalian, mana yang energinya lebih besar, nyala biru atau merah?

Absorpsi benda hitam, di modelkan sebagai kotak berongga yang pada dinding kotak di buat lubang kecil, lihat gambar 8.2! Radiasi yang jatuh pada lubang dan masuk ke dalam rongga akan terjadi pemantulan bolak-balik pada dinding rongga (pada gambar berkas sinar yang masuk berwarna biru dan keluar berwarna merah). Jika lubang itu sangat kecil dibandingkan dengan luas rongga, maka hanya sedikit yang dipantulkan kembali lewat lubang. Karena sebagian besar radiasi yang datang pada lubang akan diserap dan hanya sedikit yang keluar, maka kotak berongga yang berlubang kecil disebut sebagai benda hitam

Kembali pada gambar 8.1, apabila suhu benda naik, semakin banyak energi yang diradiasi untuk setiap panjang gelombang dan intensitas panjang gelombang, maka panjang gelombang pada intensitas maksimum bergeser ke kiri, kepanjangan gelombang yang lebih pendek. Hubungan ini disebut pergeseran Wien,

$$\lambda_{\text{mak}} T = \text{konstanta} = 2,90 \times 10^{-3} \text{ m.K} \quad (8.1)$$

di mana λ_{maks} adalah panjang gelombang untuk intensitas maks dalam meter yang terjadi pada intensitas maksimum, dan T adalah suhu benda yang dinyatakan dalam kelvin. Hukum Wien dapat digunakan untuk menentukan panjang gelombang intensitas maks jika suhu diketahui. Jadi, dari persamaan 8.1 kita dapat memprediksi suhu suatu bintang berdasarkan radiasi yang dipancarkan.

Radiasi total untuk semua panjang gelombang seperti yang ditunjukkan pada gambar 8.1 adalah,

$$E = \sigma T^4 \quad (8.2)$$

Di mana σ adalah konstanta Stefan-Boltzman, dan nilainya ditentukan berdasarkan penelitian sebesar $5,6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$. Persamaan 8.2 disebut hukum Stefan. Satuan energi yang diradiasikan adalah (W/m^2). Hukum Stefan dapat digunakan untuk menganalisis besarnya radiasi Matahari yang diterima oleh setiap planet. Karena matahari mempunyai luas permukaan seperti bola ($4\pi R^2$) dan energi radiasi matahari seperti radiasi benda hitam,

$$4\pi(R_{\odot}^2)E_{\odot} = 4\pi(R_{\odot}^2)\sigma T^4 = 3,8 \times 10^{26} \text{ W} \quad (8.3)$$

Suhu rata-rata di permukaan Matahari adalah $T = 5800 \text{ K}$ dan jari-jari Matahari $R = 6,96 \times 10^8 \text{ m}$. Persamaan 8.3 disebut *luminositas* Matahari. Pada saat Matahari meradiasi energi dari permukaannya seluas $4\pi R^2$, dengan energi yang sama mengalir melalui permukaan sebesar $4\pi(r_p^2)$. Dimana $(r_p)^2$ adalah jarak Matahari ke planet, sehingga fluks energinya (E_p) yang diterima sampai ke planet adalah,

$$E_p = 4\pi(R_{\odot}^2) \frac{\sigma T^4}{4\pi(r_p^2)} = \left(\frac{R_{\odot}}{r_p}\right)^2 E_{\odot} \quad (8.4)$$

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik kalian**, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 8.1

Matahari mempunyai beberapa lapisan, yaitu inti Matahari, zona radiasi, zona konveksi, fotosfer, kromosfer dan korona. Pada lapisan fotosfer bagian atas mempunyai suhu 4500 K dan pada kedalaman 260 km suhunya mencapai 6800 K . Berapa panjang gelombang pada intensitas maksimum pada suhu tersebut?

Penyelesaian:

Dari soal di atas maka,

Diketahui:

$$T_1 = 4500 \text{ K}$$

$$T_2 = 6800 \text{ K}$$

Ditanya:

Panjang gelombang maksimum (λ_{maks})?

Jawab:

Berdasarkan persamaan 8.1 kita dapat menentukan panjang gelombang maksimum,

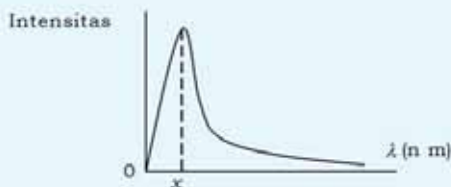
$$\text{Di lapisan atas, } \lambda_{\text{maks}} = \frac{2,90 \times 10^{-3} \text{ m.K}}{4500 \text{ K}} = 644 \text{ nm}$$

$$\text{Ke dalaman 260 km, } \lambda_{\text{maks}} = \frac{2,90 \times 10^{-3} \text{ m.K}}{6800 \text{ K}} = 426 \text{ nm}$$

Oleh karena itu, Matahari memancarkan radiasi dengan intensitas maksimum pada warna oranye pada daerah cahaya tampak. Ingat, lapisan fotosfer merupakan awal dari lapisan atmosfer Matahari dan pada lapisan ini terjadi transisi gas dari cahaya tidak tampak menjadi cahaya tampak. Pada lapisan ini radiasi mulai lepas ke ruang angkasa diantaranya sampai ke planet Bumi.

Tugas 8.1

Distribusi radiasi energi panas yang dipancarkan oleh manusia ditunjukkan pada gambar di bawah. Suhu tubuh normal orang sehat adalah 37°C .



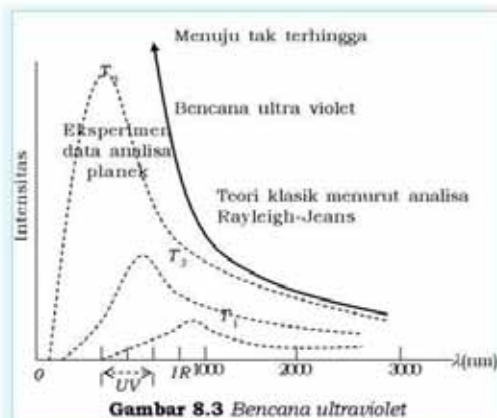
Hitunglah nilai x !

Diskusikan

1. Berapa besar suhu di permukaan Matahari?
2. Bagaimana cara menentukan besarnya suhu permukaan Matahari?

B. Bencana Ultraviolet dan Hipotesa Planck

Teori fisika klasik memprediksi tentang sifat benda hitam dengan cara perhitungan yang didasarkan pada jumlah mode dari gelombang berdiri. Dalam radiasi benda hitam intensitasnya berbanding lurus dengan $(1/\lambda^4)$. Prediksi dari teori fisika klasik yang dianalisa oleh Rayleigh-Jean (R-J) hanya sesuai dengan eksperimen pada panjang gelombang yang besar. Untuk panjang gelombang yang pendek ada sedikit koreksi. Teori klasik memberikan suatu argumen bahwa intensitas radiasi akan naik jika panjang gelombang menuju nol, lihat gambar 8.3. Prediksi ini tidak sesuai dengan hasil pengamatan yang disebut sebagai bencana ultraviolet. Dinamakan ultraviolet karena sulit terjadi pada panjang gelombang pendek yang seharusnya untuk panjang gelombang sinar violet dan arti bencana karena energi yang diramalkan menuju tak terhingga.



Gambar 8.3 Bencana ultraviolet

Kesulitan ini diatasi oleh seorang ahli fisika Jerman, Max Planck, yang telah menguji kembali fenomena ini. Pada tahun 1900, Planck memberikan suatu koreksi yang benar antara teori dan hasil eksperimen, dengan idenya yang menakjubkan, yaitu bahwa osilator termal hanya memancarkan energi bersifat diskrit. Dengan kata lain energi yang dipancarkan bukan merupakan bentuk kontinyu melainkan diskrit atau terkuantisasi.

Energi diskrit untuk osilator thermal dikaitkan dengan frekuensi osilasi yaitu,

$$E_n = n(h\nu), n = 1, 2, 3, \dots \quad (8.5)$$

Jadi energi diskritnya merupakan perkalian dari nilai n terhadap $h\nu$. Simbol h adalah konstanta Planck yang besarnya $6,63 \times 10^{-34}$ J.s

Hubungan yang ada pada persamaan 8.5 disebut hipotesis Planck. Energi osilator yang terkecil adalah $n = 1$, $E = h\nu$. Besaran $h\nu$ disebut energi kuantum. Energi satu foton didefinisikan sebagai (n) . Jadi, dalam hipotesa Planck hanya mungkin terjadi pada energi absorpsi dan emisi dalam jumlah yang terkuantisasi. Planck mendapat hadiah Nobel pada tahun 1918 dari hipotesa kuantum.

Tugas 8.2

Lampu wolfram 50 W memancarkan cahaya dengan panjang gelombang 5800 angstrom. Tentukan jumlah foton yang dipancarkan lampu tersebut setiap sekon!

C. Efek Fotolistrik

Konsep kuantisasi cahaya yang diperkenalkan oleh Einstein pada tahun 1905 dalam papernya yang bertemakan emisi dan absorpsi cahaya, cukup menarik dan pada saat yang bersamaan ia mempublikasikan tentang teori relativitas khusus. Sedikit agak kontras dengan hipotesa Planck yang lebih bersifat praktis dalam menganalisis dan memperbaiki data radiasi benda hitam, Einstein lebih bersifat mendasar.

Energi kuantisasi berkaitan dengan panjang gelombang elektromagnetik. Menurut Einstein jika energi molekul yang berosilasi dari material panas terkuantisasi, maka harus tunduk pada hukum kekekalan energi dan radiasi yang dipancarkan juga terkuantisasi.

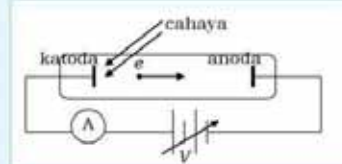
Sebuah kuantum atau paket cahaya mengacu pada pengertian foton dan setiap foton mempunyai energi sebesar,

$$E = h\nu \quad (8.6)$$

Dengan ini memunculkan suatu ide bahwa cahaya bertingkah laku sebagai partikel daripada bersifat gelombang. Jadi persamaan 8.6 menghubungkan sifat gelombang cahaya yang ditunjukkan oleh frekuensi, dan sifat partikel yang ditunjukkan oleh energi foton yang terkuantisasi. Dengan kata lain, jika mengetahui besarnya frekuensi atau panjang gelombang cahaya, kita dapat menggunakan persamaan 8.6 untuk menentukan besarnya jumlah energi setiap foton, atau sebaliknya.

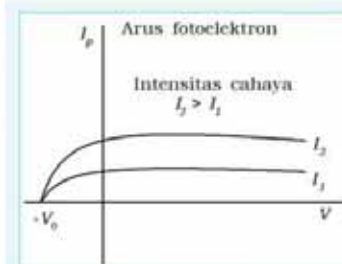
Konsep yang dikemukakan oleh Einstein dipergunakan untuk menjelaskan peristiwa efek fotolistrik, karena fisika klasik tidak bisa menerangkan fenomena ini. Jika cahaya menumbuk pada permukaan logam yang bersifat sensitif terhadap cahaya (*photo-sensitive*), maka logam akan memancarkan elektron. Energi foton digunakan untuk membebaskan elektron dari permukaan material. Material-material seperti ini digunakan untuk membuat fotosel (seperti sel surya = tenaga matahari yang digunakan untuk sumber listrik), lihat gambar 8.4.

Gambar 8.4, menunjukkan skema proses efek fotolistrik dimana jika cahaya menumbuk katode dan elektron akan dibebaskan dan bergerak menuju anoda. Elektron yang dibebaskan (fotoelektron) akan tercatat sebagai aliran arus dalam suatu rangkaian dan dapat terbaca pada ammeter (A).



Gambar 8.4 Desain eksperimen untuk pengamatan efek fotolistrik

Jika seberkas cahaya monokromatik dijatuhkan pada katoda, maka grafik hubungan antara arus foto elektron dengan beda potensial, dapat dilihat gambar 8.5. Arus elektron akan naik seiring dengan kenaikan beda potensial sampai terjadi arus jenuh (arus konstan). Pada keadaan seperti ini semua elektron yang dipancarkan sudah mencapai anoda sehingga dengan kenaikan voltase tidak mempengaruhi kenaikan arus.



Gambar 8.5 Arus foton fungsi beda potensial untuk dua intensitas yang berbeda

Secara klasik, arus berbanding lurus dengan intensitas cahaya datang, semakin besar intensitas semakin banyak elektron yang dilepaskan.

Bila kemudian beda potensial diturunkan sehingga pada tegangan V_0 tidak ada arus yang mengalir, maka tegangan V_0 disebut potensial penghenti dan besarnya energi kinetik maksimum elektron

$$\left(\frac{1}{2}mv^2\right)_{\max} = E_{\max} = eV_0 \quad (8.7)$$

Dari percobaan efek foto listrik yang disimpulkan Einstein dinyatakan sebagai,

$$h\nu = E_{\max} + \Phi \quad (8.8)$$

di mana ν frekuensi cahaya yang dijatuhkan pada target (katoda) dan Φ adalah fungsi kerja target yaitu energi ikat dari atom target. Bila persamaan 8.7 dimasukkan ke persamaan 8.8 diperoleh,

$$h\nu = eV_0 + \Phi \rightarrow V_0 = \left(\frac{h}{e}\right)\nu - \frac{\phi_0}{e} \quad (8.9)$$

Rasio $\frac{h}{e}$ dan $\frac{\phi_0}{e}$ pada persamaan 8.9 adalah konstan. Bila ν cahaya yang dijatuhkan pada target divariasikan, maka potensial penghenti yang diperlukan juga berubah. Maka dapat dikatakan energi juga berubah. Maka dapat dikatakan energi kinetik elektron yang sebanding dengan potensial penghenti tergantung pada frekuensi cahaya yang dijatuhkan pada target.

Tugas 8.3

- Buatlah grafik menjadi $y = mx - n$, $y = V_0$, $x = \nu$, $m = \frac{h}{e}$ dan $n = \frac{\phi_0}{e}$
- Dengan diukurnya V_0 , ν , e dan ϕ_0 , tentukan h dari grafik $y = mx - n$

Bila ν_0 disebut frekuensi ambang, maka ν_0 adalah frekuensi terkecil dari cahaya yang dijatuhkan pada target sehingga target masih dapat melepaskan elektron tetapi elektron tidak mempunyai energi kinetik. Dari persamaan 8.8, maka

$$h\nu_0 = \phi_0 \quad (8.10)$$

Di bawah frekuensi ambang elektron tidak terlepas dari ikatan inti.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 8.2

Fungsi kerja untuk logam tertentu sebesar 2,00 eV. Jika logam diradiasi cahaya monokromatik dengan panjang gelombang 570 nm,

- berapa kelajuan elektron yang dipancarkan?
- berapa potensial penghentinya?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$\phi_0 = 2,00 \text{ eV} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV} = 3,20 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$\lambda = 570 \text{ nm} = 5,70 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Ditanya:

- kelajuan maksimum (v_{maks})?
- potensial penghenti (V_0)?

Jawab:

- Kelajuan maksimum dapat diperoleh berdasarkan persamaan 8.9. Pertama menghitung energi foton cahaya yang memberikan panjang gelombang, yaitu dengan menggunakan persamaan 8.6 dan $c = \lambda\nu$, sehingga

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s})(3 \times 10^8 \text{ m/s})}{5,70 \times 10^{-7} \text{ m}} = 3,49 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Energi kinetik maksimum,

$$E_{\text{maks}} = h\nu - \phi_0 = 3,49 \times 10^{-19} \text{ J} - 3,20 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$E_{k\text{maks}} = 0,29 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Kelajuan elektron yang dilepas,

$$E_{k\text{maks}} = (1/2)mv_{\text{maks}}^2 \rightarrow v_{\text{maks}} = \sqrt{\frac{2E_{k\text{maks}}}{m}}$$

$$v_{\text{maks}} = \sqrt{\frac{2(2,9 \times 10^{-20} \text{ J})}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = \sqrt{\frac{2(2,9 \times 10^{-20} \text{ J})(10^{31})}{9,11 \text{ kg}}} = 0,25 \times 10^6 \text{ m/s}$$

- Potensial penghenti,

$$V_0 = \frac{E_{k\text{maks}}}{e} = \frac{2,9 \times 10^{-20} \text{ J}}{1,60 \times 10^{-19} \text{ C}} = 0,18 \text{ J/C} = 0,18 \text{ V}$$

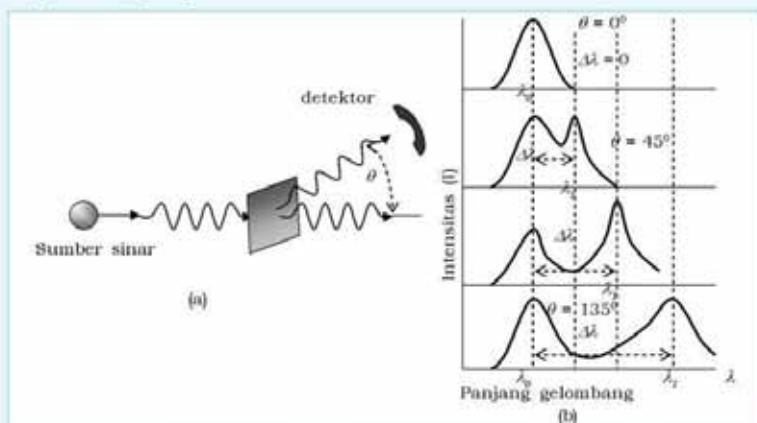
Tugas 8.4

Cahaya dengan panjang gelombang 800 angstrom menyinari permukaan logam yang memiliki fungsi kerja $0,3 \times 10^{-19}$ joule. Jika $h = 6,6 \times 10^{-34}$ Js dan $c = 3 \times 10^8$ m/s, tentukanlah:

- Energi kinetik maksimum elektron!
- Potensial penghenti!

D. Efek Compton

Pada tahun 1923 seorang fisikawan Amerika yang bernama Arthur H Compton (1892-1962) menjelaskan fenomena yang diamati pada hamburan sinar-X dari karbon (grafit) dengan memperhatikan radiasi yang mencakup sifat kuantisasi energi. Hasil eksperimen memberikan suatu bukti bahwa cahaya sebagai gelombang elektromagnetik yang terdiri dari energi yang terkuantisasi, sehingga cahaya tetap dilihat sebagai partikel. Dengan kata lain cahaya mempunyai sifat dualisme.



Gambar 8.6 Hamburan sinar-X (a) Skema hamburan sinar-X (b) Grafik intensitas hambur ν_{λ} , terjadi perubahan intensitas pada panjang gelombang fungsi sudut θ

Hasil pengamatan yang ditunjukkan oleh Compton, jika berkas sinar-X monokromatik dikenakan pada grafit, maka sinar hamburnya mempunyai panjang gelombang yang lebih besar daripada berkas sinar yang datang. Perubahan panjang gelombang

juga ditentukan oleh sudut dari berkas sinar -X yang dihamburkan bukan pada berkas sinar -X yang datang, lihat gambar 8.6. Hubungan antara panjang gelombang antara sinar datang dan sinar hambur ditanyakan sebagai

$$\Delta\lambda = \lambda_1 - \lambda_0 = \lambda_c (1 - \cos\theta) \quad (8.11)$$

Di mana λ_0 adalah panjang gelombang berkas sinar datang, λ_1 adalah panjang gelombang berkas sinar hambur, dan λ_c adalah panjang gelombang Compton yang besarnya

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,43 \times 10^{-12} \text{ m} = 2,43 \times 10^{-3} \text{ nm} \quad (8.12)$$

Hal ini bertentangan dengan teori klasik, di mana frekuensi atau panjang gelombang berkas sinar yang dihamburkan sama dengan frekuensi atau panjang gelombang berkas sinar datang. Artinya, bahwa elektron-elektron dalam atom menyerap energi radiasi dan beresilasi pada frekuensi yang sama dengan frekuensi yang datang, sehingga saat energi dipancarkan kembali mempunyai frekuensi sama pada semua arah.

Efek Compton dijelaskan oleh Einstein bahwa energi foton yang datang sebesar $h\nu$, perubahan panjang gelombang yang diamati oleh Compton menunjukkan adanya perubahan energi foton. Disini energi foton hambur lebih kecil daripada energi foton yang datang. Efek dari sudut hamburan merupakan bentuk tumbukan partikel yang bersifat elastis. Compton memberikan gambaran bahwa jika berkas sinar yang datang diperlakukan sebagai partikel yang menumbuk elektron diam sehingga kehilangan energi foton dan momentum setelah tumbukan dengan elektron, energi tersebut diberikan ke elektron. Karena dalam tumbukan elastis berlaku hukum kekekalan energi dan momentum. Dengan teori ini Compton mendapat hadiah Nobel pada tahun 1927.

Contoh Soal 8.3

Berkas sinar monokromatik dari sumber sinar-X dengan panjang gelombang $1,35 \times 10^{-10} \text{ m}$ dijatuhkan pada sebuah logam tipis. Berapa persen pergeseran panjang gelombang untuk sinar hambur bila sinar terhambur pada sudut 45° ?

Penyelesaian:

Kita mengharapkan suatu perubahan panjang gelombang yang bernilai positif dengan menunjukkan kenaikan panjang

gelombang yang terhambur dibandingkan dengan panjang gelombang yang datang.

Dari soal diketahui:

$$\lambda_0 = 1,35 \times 10^{-10} \text{ m}$$

$$\theta = 45^\circ$$

Ditanya:

Pergeseran panjang gelombang (%)?

Jawab:

Perubahan atau pergeseran $\Delta\lambda$, diberikan oleh persamaan 8.11, dan fraksi perubahannya, $\Delta\lambda/\lambda_0$

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = \frac{\lambda_C}{\lambda_0} (1 - \cos \theta)$$

$$\begin{aligned}\frac{\Delta\lambda}{\lambda} &= \frac{2,43 \times 10^{-12} \text{ m}}{1,35 \times 10^{-10} \text{ m}} (1 - \cos 45^\circ) \times 100\% \\ &= 1,8 \times 10^{-2} (1 - 0,71) \times 100\% = 2,09\%\end{aligned}$$

Tugas 8.5

Seberkas sinar dengan panjang gelombang 10^{-14} m menumbuk sebuah proton bermassa $1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ yang diam. Tentukan panjang gelombang sinar yang terhambur, jika setelah tumbukan sinar dibelokkan sebesar 45° terhadap arah semula!

Rangkuman

1. Apabila suhu benda semakin naik, semakin banyak energi yang diradiasi untuk setiap panjang gelombang dan panjang gelombang untuk intensitas maksimum semakin pendek. Hubungan ini disebut pergeseran Wien,
 $\lambda_{\text{max}} T = \text{konstanta} = 2,90 \times 10^{-3} \text{ mK}$
2. Radiasi total untuk semua panjang gelombang adalah,
 $E = \sigma T^4$
3. Energi diskrit untuk osilator termal dikaitkan dengan frekuensi osilasi yaitu, $E_n = n(h\nu)$ $n = 1, 2, 3, \dots$

- Sebuah kuantum atau paket cahaya mengacu pada pengertian foton dan setiap foton mempunyai energi sebesar, $E = h\nu$
- Energi kinetik maksimum elektron yang dipancarkan dari material foton adalah, $E_{k\max} = eV_0$, V_0 = beda potensial antara katoda dan anoda
- Hubungan frekuensi ambang dengan energi ambang yang diperlukan untuk membebaskan elektron, yaitu

$$h\nu_0 = E_{k\max} + \varphi_0 \rightarrow h\nu_0 = 0 + \varphi_0 \text{ di mana } \nu_0 = \frac{\varphi_0}{h}$$

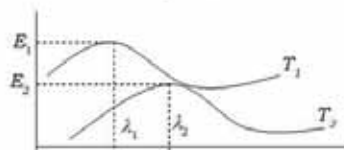
ν_0 adalah frekuensi ambang saat energi kinetik maksimumnya nol.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

- Tenaga yang dipancarkan oleh benda pijar tiap detik per meter persegi sebanding dengan pangkat empat suhu mutlaknya. Pernyataan ini dikenal dengan hukum
 - Stefan-Boltzman
 - Joule
 - Planck
 - wien
 - Maxwell
- Hukum pergeseran wien mengatakan bahwa pada kenaikan suhu intensitas maksimum bergeser dari daerah
 - sinar merah ke ungu
 - frekuensi tinggi ke rendah
 - panjang gelombang pendek ke panjang
 - biru ke merah
 - sinar merah ke Inframerah
- Menurut Planck, bahwa cahaya terdiri dari paket-paket energi yang disebut foton, di mana tiap-tiap foton membawa energi yang
 - sebanding dengan panjang gelombangnya
 - sebanding dengan frekuensinya

- c. sebanding dengan kuadrat frekuensinya
 d. berbanding terbalik dengan frekuensinya
 e. berbanding lurus dengan amplitudonya
4. Jika tetapan Planck $6,63 \times 10^{-34}$ J.s, maka energi foton gelombang elektromagnet yang frekuensinya 5000 Hz adalah . . . joule
 a. $3,315 \times 10^{-30}$ d. $2,50 \times 10^{-30}$
 b. $3,20 \times 10^{-30}$ e. $2,65 \times 10^{-30}$
 c. $3,00 \times 10^{-30}$
5. Sebuah benda suhunya 127°C , maka panjang gelombang radiasi yang membawa energi terbesar adalah (tetapan wien = $2,8 \times 10^{-3}$ m.K)
 a. $7,0 \times 10^{-6}$ m d. $1,4 \times 10^{-6}$ m
 b. $3,5 \times 10^{-6}$ m e. $1,12 \times 10^{-6}$ m
 c. $2,0 \times 10^{-6}$ m
6. Energi yang diradiasikan per detik oleh benda hitam pada suhu T_1 , besarnya 16 kali energi yang diradiasikan per detik pada suhu T_0 , maka T_1 sama dengan . . .
 a. $2 T_0$ d. $4 T_0$
 b. $2,5 T_0$ e. $5 T_0$
 c. $3 T_0$
7. Pemancar Radio berdaya 1000 watt, memancarkan foton tiap detiknya 5×10^{20} buah, maka energi tiap fotonnya adalah . . .
 a. 2×10^{-6} joule d. 2×10^{-20} joule
 b. 5×10^{-6} joule e. 5×10^{-20} joule
 c. 2×10^{-18} joule
8. Intensitas radiasi benda hitam mempunyai grafik hubungan antara E dan λ seperti pada gambar di atas.



1. $E_1 T_1 > E_2 T_2$ 3. $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{T_2}{T_1}$
 2. $T_1 > T_2$ 4. $\frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{E_1}{E_2}$

Pernyataan yang benar adalah . . .

- a. 1, 2, dan 3 d. 4 saja
 b. 1 dan 3 e. semua benar
 c. 2 dan 4

9. Intensitas radiasi maksimum dari spektrum sinar matahari terjadi pada $\lambda = 475 \text{ nm}$, maka dapat ditentukan bahwa suhu permukaan matahari adalah
 - a. 5000 K
 - b. 5500 K
 - c. 6100 K
 - d. 6500 K
 - e. 7000 K
10. Suatu benda hitam pada suhu 27°C memancarkan energi 162 J/s . Benda hitam tersebut dipanasi sehingga suhunya menjadi 127°C . Energi yang dipancarkan menjadi
 - a. 1536 J/s
 - b. 1024 J/s
 - c. 512 J/s
 - d. 256 J/s
 - e. 162 J/s

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Sebuah bola lampu pijar bekerja pada suhu 3000 K , luas total permukaan filamen adalah $0,05 \text{ cm}^2$ dan emisivitasnya adalah $0,3$. Hitung daya yang dipancarkan lampu tersebut!
2. Luas permukaan badan seseorang adalah $1,2 \text{ m}^2$ dan suhu badannya 37°C . Jika $e = 0,4$, hitung total energi radiasi rata-rata dari badan tiap detik!
3. Sebuah filamen lampu dipanasi sampai suhunya 887°C . Hitung pada panjang gelombang berapa intensitas radiasi yang paling kuat terjadi!
4. Lubang kecil yang luasnya $0,1 \text{ cm}^2$ dalam suatu perapian yang suhunya 727°C dapat dianggap sebagai benda hitam sempurna. Hitung energi yang dipancarkan dari lubang selama 10 sekon !
5. Apabila 10% energi lampu pijar dipancarkan sebagai sinar tampak yang panjang gelombangnya 5400 \AA . Hitunglah jumlah foton yang dipancarkan lampu pijar 100 watt setiap detik!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab IX

Teori Atom

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat mendeskripsikan dan menjelaskan perkembangan teori atom.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Elektron
2. Proton
3. Energi

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

1. Model atom menurut Demokritus, Dalton, Thompson, Rutherford, dan Bohr
2. Tingkatan energi elektron
3. Hipotesis de Broglie
4. Atom dengan banyak elektron

Kalian tentu telah mengetahui bahwa semua benda tersusun dari atom-atom. Asumsi mengenai atom tidaklah sama, melainkan terus menerus mengalami perkembangan hingga sekarang. Pada bab ini kita akan mempelajari mengenai atom dan bagaimana pendapat ilmuwan terdahulu mengenai atom hingga jaman sekarang.

A. Atom Menurut Demokritus

Demokritus (460-370 SM) adalah ahli filsafat Yunani yang telah mengemukakan suatu gagasan awal tentang pengertian atom. Menurutnya, suatu zat tidak dapat dibagi terus-menerus dan mempunyai batas ukuran terkecil yang disebut atom. Atom berasal dari kata *atomos* yang berarti tidak dapat dibagi lagi. Pendapat Demokritus tidak didasarkan hasil eksperimen, namun hanya didasarkan pada pemikiran semata.

B. Teori Atom Dalton

John Dalton (1766-1844) telah mengemukakan konsep atom yang lebih maju. Atom merupakan bagian terkecil dari suatu zat. Atom dari suatu unsur tidak bisa dirubah ke bentuk atom unsur lain. Dua atom atau lebih yang berasal dari unsur lain dapat membentuk suatu unsur baru yang disebut molekul atau senyawa. Pembentukan molekul atau senyawa baru yang berasal dari unsur yang berbeda mempunyai perbandingan yang sederhana dan tertentu dengan jumlah massa total selalu konstan.

C. Teori Atom Thompson

J.J Thompson (1904) mengemukakan model atom yang sedikit berbeda dengan pendapat Dalton. Menurut pendapat Thompson, atom mempunyai dua muatan yang berlawanan jenis, yaitu terdiri dari muatan positif dan negatif yang tersebar merata di permukaan atom. Jumlah kedua muatan itu sama sehingga atom bersifat netral.

Pada tahun 1897, Thompson berhasil menemukan perbandingan antara muatan elektron dan massanya selalu

mendapatkan bilangan yang konstan. Hasil perhitungan $\frac{e}{m}$ adalah:

$$\frac{e}{m} = 1,7588 \cdot 10^{11} \text{ C/kg.}$$

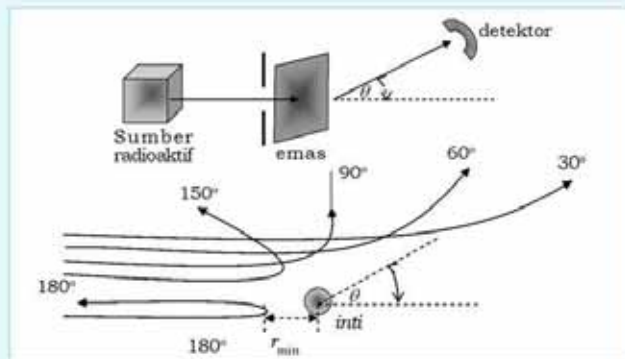
Beberapa tahun kemudian, R.A Millikan berhasil melakukan percobaan untuk mengukur besarnya muatan ini. Besarnya e adalah $1,6021 \times 10^{-19}$ coulomb.

Berdasarkan penemuan Thompson dan Millikan didapatkan besarnya massa elektron adalah:

$$m_e = 9,1091 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

D. Model Atom Rutherford

Rutherford menyusun model atom baru yang sudah didasarkan pada hasil pengamatan melalui sebuah eksperimen, yang mana sangat berbeda dengan model atom Thompson. Eksperimen yang dilakukan oleh Rutherford menggunakan partikel alfa yang ditembakkan ke lempeng logam emas tipis.



Gambar 9.1 Hamburan sinar α

Dari hasil pengamatan menunjukkan bahwa hamburan sinar α terdeteksi berbagai sudut, bahkan ada yang membentuk sudut 180° . Rutherford menyimpulkan bahwa:

1. Atom terdiri dari muatan positif dan negatif dimana kedua muatan tersebut mempunyai jarak yang lebih besar/jauh dibandingkan dengan ukuran kedua muatan tersebut.
2. Atom terdiri dari inti atom yang bermuatan positif dan elektron bergerak mengelilingi inti atom.
3. Inti atom dan elektron mempunyai gaya tarik-menarik sehingga mempunyai percepatan sentripetal untuk mempertahankan elektron dalam garis edarnya/mengorbit.

4. Elektron dalam mengelilingi inti atom sambil memancarkan energi elektromagnetik. Menurut teori klasik, elektron yang mendapat percepatan akan meradiasi gelombang elektromagnetik. Hal ini yang menjadi salah satu kelemahan dari teori Rutherford karena jika elektron berputar mengelilingi inti atom sambil mengeluarkan energi maka dalam waktu tertentu elektron akan kehilangan energi sehingga pada akhirnya akan menumbuk inti atom. Dengan kata lain, jari-jari orbit elektron akan berkurang dan di sisi lain frekuensi sudutnya bertambah sehingga pada akhirnya bertumbukan dengan inti atom.

KISI

Rutherford berasal dari keluarga besar dengan 11 anak dan dibesarkan di peternakan kecil keluarganya di Selandia Baru. Dia pandai di sekolah, khususnya dalam matematika. Setelah belajar di universitas di Selandia Baru, dia pergi ke Combridge di Inggris.

Di Inggris dia meneliti tentang radioaktivitas, dia menemukan bahwa zat radioaktif menghasilkan 3 jenis radiasi yang berbeda. Hal ini merupakan saat yang meneduhkan bagi ilmuwan karena mereka baru mempelajari inti atom. Rutherford melanjutkan meneliti atom dan mengumpulkan para ilmuwan lain di laboratoriumnya, seperti Chadwick yang menemukan neutron, dan Cock Croft (yang membuat akselerator proton penghancur atom). Karya mereka ini dan ilmuwan lain seperti Marie dan Pierre Curie, Enrico Fermi dan Nells Bohr memulai suatu abad baru: Nuklir.

E. Teori Bohr

Pada tahun 1800, suatu eksperimen yang sangat fundamental telah dilakukan pada lucutan tabung gas yang berisi hidrogen, neon dan uap air raksa. Pada umumnya cahaya hasil dari lucutan gas menunjukkan sifat spektrum yang kontinyu, namun dari hasil ini didapatkan bentuk emisi yang bersifat diskrit atau bentuk garis-garis. Cahaya yang datang dari tabung memberikan warna garis terang yang menunjukkan bahwa hanya panjang gelombang tertentu yang muncul. Spektrum garis yang bersifat diskrit berbeda untuk atom atau molekul yang berbeda.

Atom-atom yang menyerap panjang gelombang cahaya tertentu akan memancarkan kembali cahaya tersebut. Jika cahaya putih melalui gas yang dingin maka frekuensi atau panjang gelombang tertentu akan hilang. Hasil ini disebut sebagai spektrum absorpsi, yaitu munculnya garis-garis gelap. Jika garis absorpsi dan emisi

untuk gas tertentu di bandingkan, maka mereka akan ditemukan pada frekuensi yang sama. Fenomena seperti ini sulit untuk dipahami, dan mereka mengacu pada pilihan terakhir mengenai struktur atom yang bersifat elektronik.

Hidrogen dengan spektrum tampak yang sederhana mendapat perhatian untuk dianalisis lebih lanjut, karena hidrogen hanya terdiri satu elektron dan satu proton. Pada akhir abad 19, ahli fisika J.J Balmer menemukan suatu formula untuk spektrum garis dari atom hidrogen,

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \text{ di mana } n = 3, 4, 5, \dots \quad (9.1)$$

di mana R adalah konstanta Ryberg yang nilainya $1,097 \times 10^{-2} \text{ n/m}$. Spektrum garis pada daerah tampak dari atom hidrogen disebut deret Balmer. Balmer menemukan formula yang jitu seperti pada pers (9.1), namun tidak memahami mengapa dapat terjadi demikian. Hal yang sama untuk spektrum garis dalam daerah ultraviolet dan inframerah.

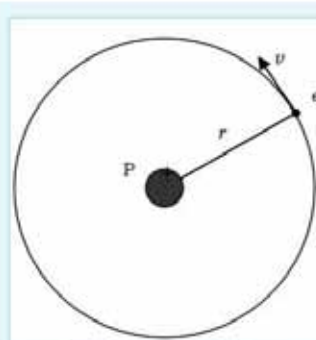
Niels Bohr seorang ahli fisika dari Denmark, pada tahun 1913 dapat menjelaskan tentang fenomena spektrum garis yang terjadi pada atom hidrogen dengan hipotesisnya sebagai berikut.

Elektron mengorbit proton dengan lintasan berbentuk lingkaran, digambarkan seperti orbit planet terhadap Matahari, lihat gambar 9.2. Gaya Coulomb berfungsi sebagai gaya sentripetal untuk mempertahankan gerak melingkar dan secara matematis dapat dituliskan dengan bentuk persamaan,

$$F = \frac{mv^2}{r} = \frac{ke^2}{r^2} \quad (9.2)$$

di mana e adalah besarnya muatan proton atau elektron, v adalah kelajuan elektron pada orbitnya dan r adalah jari-jari orbit.

Energi elektron total adalah jumlah energi kinetik dan potensial.



Gambar 9.2 Atom hidrogen menurut Bohr

$$E = E_k + U = \frac{1}{2}mv^2 - \frac{ke^2}{r} \quad (9.3)$$

Berdasarkan persamaan 9.2, maka energi kinetik dapat dinyatakan,

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{ke^2}{r} \quad (9.4)$$

Kombinasi persamaan 9.3 dan 9.4 didapatkan persamaan,

$$E = E_k + U = \frac{ke^2}{2r} - \frac{ke^2}{r} = -\frac{ke^2}{2r} \quad (9.5)$$

Nilai E pada persamaan di atas adalah negatif, hal ini menunjukkan bahwa sistem pada atom mempunyai gaya ikat satu sama lain. Untuk $E = 0$, elektron tidak lagi dalam bentuk ikatan dengan proton, dan atom yang kehilangan elektron disebut atom terionisasi.

Jadi, sejauh ini hanya prinsip fisika klasik yang masih bisa diterapkan untuk menganalisis spektrum garis dari hidrogen.

Berkaitan dengan teori kuantum, Bohr mengemukakan bahwa momentum angular elektron terkuantisasi merupakan perkalian $h/2\pi$ dengan $n = 1, 2, 3, 4, \dots$. Secara matematis,

$$mvr = n \frac{h}{2\pi} \quad (9.6)$$

n disebut bilangan kuantum. Dari persamaan 9.6 dapat ditentukan besarnya kelajuan elektron mengorbit proton,

$$v = n \frac{h}{2\pi mr} \quad (9.7)$$

Dengan substitusi persamaan 9.7 ke 9.2 didapatkan,

$$\frac{m(nh/2\pi mr)^2}{r} = \frac{ke^2}{r^2}$$

dan didapatkan untuk nilai r ,

$$r_n = \left(\frac{h^2}{4\pi k e^2 m} \right) n^2 \quad (9.8)$$

Indek yang tertera pada r_n yaitu n , menunjukkan jari orbit ke n . Jadi, secara umum, atom mempunyai kulit-kulit atom yang diduduki oleh sejumlah elektron tertentu.

Energi untuk keadaan kulit atom tertentu yang berkaitan dengan nilai r ,

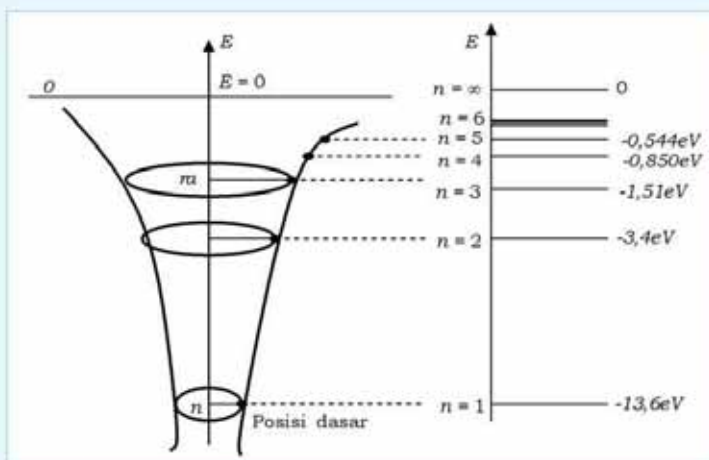
$$E_n = -\frac{ke^2}{2r_n} = -\frac{ke^2}{2} \left(\frac{4\pi^2 k e^2 m}{h^2 n^2} \right) \approx -\frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{n^2 h^2} = -\frac{2\pi^2 k^2 m e^4}{n^2 h^2} \quad (9.9)$$

Persamaan 9.9 menunjukkan bahwa E_n adalah energi yang tergantung pada bilangan kuantum n .

Dengan memasukkan harga besaran dari h , e , m dan k maka persamaan 9.8 dan 9.9 dapat ditentukan nilai nominalnya yaitu, $r_n = 0,0529n^2$ nm (nano meter), dan

$$E_n = (-13,6/n^2) \text{ eV (elektron volt).}$$

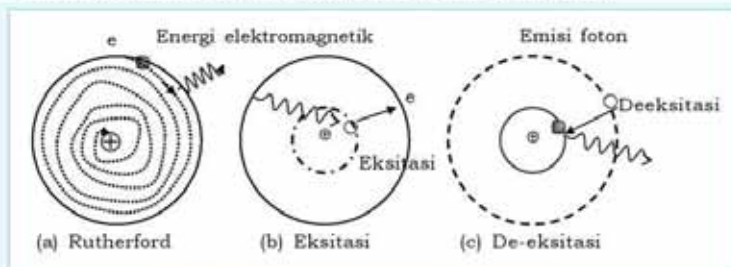
Untuk atom hidrogen dengan bilangan kuantum $n = 1$ maka bisa diketahui jari-jari atomnya, yaitu: $r = 0,0529$ nm dan $E = -13,6$ eV, lihat gambar 9.3. Artinya, jika kalian ingin melepaskan elektron hidrogen dari ikatan proton diperlukan energi dari luar minimal sebesar 13,6 eV.



Gambar 9.3 Tingkat energi dan orbit elektron pada atom hidrogen

Bohr memperbaiki teori Rutherford yang mengatakan bahwa elektron, disamping mengorbit juga memancarkan energi sehingga elektron akan mengorbit dalam bentuk spiral menuju ke inti atom (lihat gambar 9.4(a)). Bohr memperbaiki asumsi ini dan beliau mengajukan postulat baru, yaitu:

1. Elektron hidrogen tidak akan memancarkan energi selama mengorbit inti dan tetap terikat dengan inti.
2. Jika elektron menyerap energi maka terjadi proses eksitasi, yaitu elektron pindah ke orbit yang lebih tinggi dan saat turun kembali ke orbit yang lebih rendah (proses de-eksitasi) elektron akan memancarkan energi, lihat gambar 9.4(b-c).



Gambar 9.4 Orbit elektron mengelilingi inti

Contoh Soal 9.1

Tentukan jari-jari orbit dan energi elektron dalam atom hidrogen bila elektron mengorbit inti pada kulit ke 2 bilangan kuantum $n = 2$!

Penyelesaian:

Diketahui:

$$n = 2$$

Ditanya:

r_2 dan E_2 untuk atom hidrogen?

Jawab:

Untuk menentukan jari-jari orbit $n = 2$,
 $r_n = 0,0529 \times n^2 \text{ nm} = (0,0529) \times 2^2 \text{ nm} = 0,212 \text{ nm}$

Hal yang sama untuk energi elektron,

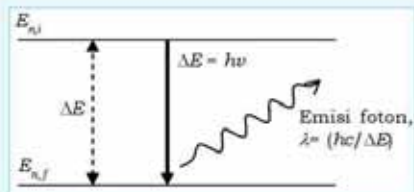
$$E_n = (-13,6/n^2) \text{ eV} = (-13,6/4) \text{ eV} = -3,40 \text{ eV}$$

Diskusikan

Berapa kelajuan elektron dalam mengorbit inti pada contoh soal 9.1?

F. Tingkat-tingkat Energi

Kemungkinan untuk menyelesaikan elektron atom hidrogen biasanya dijelaskan dalam pernyataan tingkat energi. Elektron terikat dengan inti atom. Tingkat energi terendah pada saat $n = 1$ disebut sebagai energi tingkatan dasar, $n = 2$ disebut energi eksitasi pertama dan seterusnya, lihat gambar 9.5.



Gambar 9.5 Emisi foton

Secara umum, elektron berada pada tingkat dasar sehingga perlu ada energi luar untuk mengeksitasi ke tingkat atasnya. Elektron atom hidrogen dapat tereksitasi hanya dalam bentuk diskrit. Dibayangkan seperti pada tahapan tangga. Analoginya adalah ketika orang naik tangga, tahapan demi tahapan harus dilalui melalui anak tangga dan saat orang turun tangga juga tahap demi tahap harus dilalui juga. Artinya, bahwa elektron naik ke tingkat atas maupun turun ke tingkat bawah mempunyai energi diskrit atau energi tahapan. Namun sedikit berbeda pada anak tangga, energi semakin ke atas semakin sempit jaraknya, khususnya saat mendekati $n = \infty$, lihat gambar 9.3.

Jika elektron mempunyai energi absorpsi yang cukup pada tingkat dasar, maka elektron akan melakukan transisi dari tingkat dasar ke tingkat atasnya bahkan kemungkinan akan lepas dari ikatan atom. Jika elektron lepas dari ikatan atom maka atom tersebut dikatakan terionisasi. Misalkan, ketika elektron berada pada $n = 1$ tereksitasi sampai $n = \infty$.

Saat elektron tereksitasi, secara umum tidak akan lama berada pada posisi eksitasi, elektron akan membuat transisi ke tingkat energi yang lebih rendah dalam waktu yang relatif singkat. Waktu yang diperlukan elektron berada pada posisi eksitasi disebut waktu

hidup (*life time*). Pada umumnya diperlukan waktu hidup selama 10^{-8} s. Pada saat transisi ke tingkat energi yang lebih rendah, energi dipancarkan sebagai foton, lihat gambar 9.6. Energi foton sama dengan perbedaan tingkat energi,

$$\Delta E = E_{n_i} - E_{n_f} = \frac{-13,6}{n_i^2} \text{ eV} - \frac{-13,6}{n_f^2} \text{ eV}$$

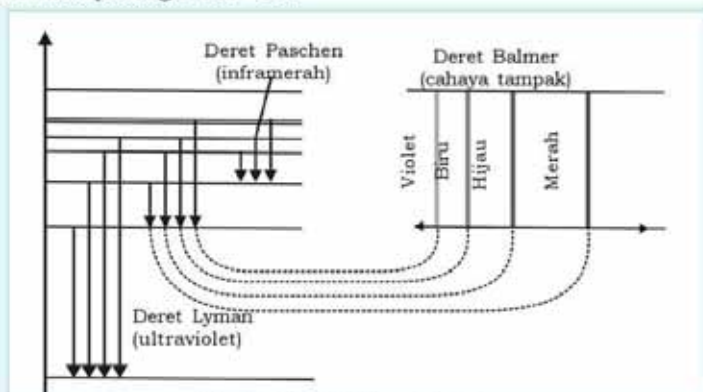
atau,

$$\Delta E = E_{n_i} - E_{n_f} = 13,6 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \text{ eV} \quad (9.10)$$

di mana indek i adalah kedudukan awal dan f adalah kedudukan akhir dan $n_f < n_i$ ($n_i = n_{p1}, n_{p2}, n_{p3}, \dots$)

Karena $\Delta E = \frac{hc}{\lambda}$ tentunya hanya nilai frekuensi dan panjang gelombang tertentu yang memungkinkan untuk dipancarkan.

Kembali kepada pengertian deret Balmer untuk daerah cahaya tampak dengan $n_f = 2$. Untuk daerah ultra ungu berkaitan dengan bilangan kuantum $n_f = 1$ atau $n = 1$ disebut sebagai deret Lyman dan untuk $n_f = 3$ atau $n = 3$ disebut deret Paschen yaitu untuk daerah inframerah pertama. Untuk $n = 4$ yaitu pada daerah inframerah kedua disebut sebagai deret Bracket dan $n = 5$ yaitu pada daerah inframerah ketiga disebut deret Pfund. Secara umum bisa dilihat pada gambar 9.6.



Gambar 9.6 Spektrum hidrogen

Contoh Soal 9.2

Berapa panjang gelombang cahaya yang dipancarkan jika elektron yang tereksitasi melakukan transisi dari tingkat energi $n = 3$ ke tingkat energi $n = 2$?

Penyelesaian:

Kita dalam hal ini akan mengharapkan deret Balmer karena elektron melakukan transisi ke tingkat energi $n = 2$. Data yang didapatkan dari soal adalah:

$$n_i = 3$$

$$n_f = 2$$

Ditanya:

Panjang gelombang dari cahaya yang dipancarkan?

Jawab:

Untuk menjawab pertanyaan ini kita gunakan persamaan:

$$\Delta E = 13,6 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \text{ eV} = 13,6 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{9} \right) \text{ eV} = 1,89 \text{ eV}$$

$$\lambda = \frac{hc}{\Delta E} = \frac{1,24 \times 10^3}{1,89} \text{ nm} = 656 \text{ nm}$$

G. Hipotesa de Broglie

Dalam mengorbit inti, meskipun diam dan tidak dalam tereksitasi maupun de-eksitasi, elektron masih mempunyai energi sebesar

$$E = p \cdot c \text{ atau } p = \frac{E}{c}$$

Karena energi $E = h\nu = hc/\lambda$ sehingga didapatkan hubungan persamaan antara momentum dan panjang gelombang,

$$p = \frac{E}{c} = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (9.11)$$

Persamaan 9.11 hanya berlaku untuk foton. Jadi, energi dalam gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang λ di bawa oleh foton sebagai partikel dengan momentum (h/λ) . Bentuk

persamaan 9.11 sebagai bentuk hipotesa Louis de Broglie yang memperkuat teori dualisme cahaya. Louis de Broglie adalah seorang fisikawan Perancis yang mengusulkan bahwa panjang gelombang suatu partikel mempunyai momentum dengan persamaan yang serupa untuk foton,

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (9.12)$$

Persamaan 9.12 adalah bentuk panjang gelombang untuk partikel yang bergerak dengan kecepatan v . Oleh karena itu, persamaan 9.12 disebut gelombang de Broglie atau gelombang materi. Sifat dualisme seperti ini juga dialami oleh elektron.

1. Bilangan Kuantum Utama

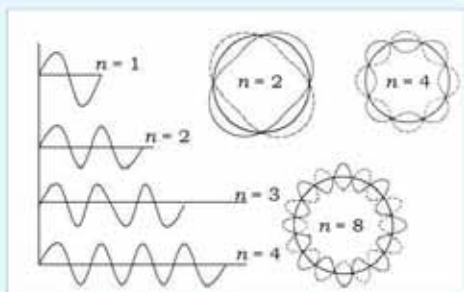
Berkaitan dengan teori Bohr, de Broglie memberikan satu argumen yang menarik bahwa keliling untuk orbit elektron dengan jari-jari r_n adalah $2\pi r_n$ dan panjang ini sama dengan perkalian bilangan bulat dengan panjang gelombangnya.

$$2\pi(r_n) = n\lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (9.13)$$

Penggabungan dengan persamaan 9.12 maka didapatkan,

$$2\pi(r_n) = \frac{nh}{mv} \rightarrow L_n = mvr_n = \frac{nh}{2\pi} \quad (9.14)$$

Jadi, persamaan ini sesuai dengan apa yang diusulkan oleh Bohr. Oleh karena itu ada sifat konsisten antara hipotesa de Broglie dengan postulat Bohr untuk atom hidrogen. Gambar 9.7 menunjukkan gelombang de Broglie dan orbit Bohr.



Gambar 9.7 Hubungan antara gelombang de Broglie dan orbit Bohr

Persamaan 9.13 memberikan gambaran tentang orbit elektron versi Bohr dan panjang gelombang versi de Broglie. Kalau kalian amati orbit elektron tersebut seperti tali yang direntang sehingga tampak seperti gelombang berdiri. Jumlah panjang gelombang merupakan kelipatan dari bilangan kuantum n . Untuk $n = 1$ terjadi satu panjang gelombang, untuk $n = 2$ terjadi dua gelombang dan seterusnya sesuai dengan persamaan 9.13.

Contoh Soal 9.3

Berapa panjang gelombang de Broglie dari sebuah elektron yang dipercepat dari posisi diam dengan beda potensial 450V?

Penyelesaian:

$$V = 45,0 \text{ V} \qquad m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

Ditanya:

Panjang gelombang de Broglie (λ)?

Jawab:

Kerja yang dilakukan untuk mempercepat elektron adalah, $W = eV$, sama dengan energi kinetiknya. Oleh karena itu kita dapat menentukan kecepatan elektron,

$$\begin{aligned} eV &= \frac{1}{2}mv^2 \\ v &= \sqrt{\frac{2eV}{m}} \\ &= \sqrt{\frac{2(1,60 \times 10^{-19} \text{ C})(45,0 \text{ V})}{9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}}} \\ &= \sqrt{15,80 \times 10^{12} \text{ m}^2/\text{s}^2} = 4,0 \times 10^6 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Panjang gelombang de Broglie,

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}}{(9,11 \times 10^{-31} \text{ kg})(4,0 \times 10^6 \text{ m/s})} = 1,8 \times 10^{-10} \text{ m}$$

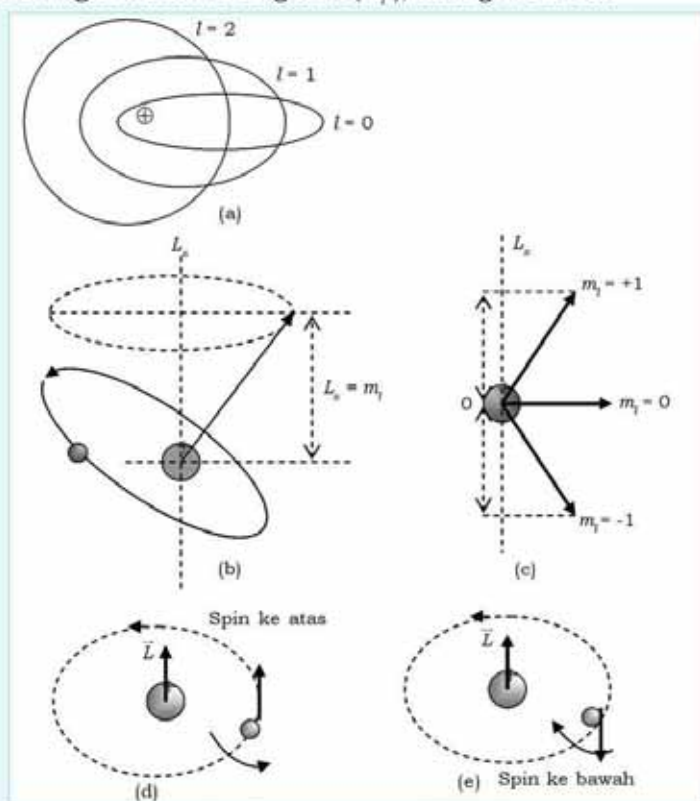
Jadi panjang gelombangnya memiliki orde 10^{-10} m . Nilai panjang gelombang ini sangat kecil sehingga diperlukan detektor yang sangat sensitif terhadap panjang gelombang tersebut.

Diskusikan

Hitung panjang gelombang de Broglie untuk partikel yang dipercepat seperti contoh soal 9.3. Bagaimana komentar kalian dari hasil perhitungan yang didapat secara numerik?

2. Bilangan Kuantum Orbital

Dalam analisis lebih lanjut tentang atom hidrogen di samping menggunakan konsep bilangan kuantum utama (n) masih ada bilangan kuantum lain yang disebut bilangan kuantum orbital (l) dan bilangan kuantum magnetik (m_l), lihat gambar 9.8.



Gambar 9.8 Hubungan keempat bilangan kuantum

Bilangan kuantum orbital dikaitkan dengan momentum anguler elektron yang disebabkan oleh gerakan elektron mengorbit inti. Bilangan kuantum orbital mempunyai nilai bilat untuk setiap bilangan kuantum utama dari 0 sampai $l = (n-1)$. Contoh untuk $n = 3$, kemungkinan untuk nilai l adalah 0, 1, dan 2 dan $n = 2$ mempunyai nilai $l = 0$ dan 1. Jadi, jumlah perbedaan nilai l sama dengan nilai untuk n . Dengan kata lain untuk $n = 3$ ada tiga kemungkinan untuk l . Dalam atom hidrogen energi tergantung pada nilai n , oleh karena itu perbedaan nilai l semuanya akan memberikan nilai energi yang sama, dan disebut degenerasi.

3. Bilangan Kuantum Magnetik

Bilangan kuantum magnetik m_l adalah nama yang diambil dari aslinya ketika melakukan eksperimen dengan menggunakan medan magnet yang dapat mempengaruhi elektron atom hidrogen. Hasil pengamatan menunjukkan adanya spektrum garis. Jadi, bilangan kuantum magnetik menggambarkan pengaruh magnet terhadap elektron. Bilangan kuantum magnetik tidak ikut menentukan besarnya energi.

Bilangan kuantum magnetik dikaitkan dengan orientasi momentum anguler dalam ruang. Bilangan kuantum magnetik mempunyai nilai bulat positif dan negatif untuk setiap nilai l dari nol sampai $\pm l$. Contoh: untuk $l = 2$ maka $m_l = -2, -1, 0, 1, 2$ dan untuk $l = 3$ maka $m_l = -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3$. Secara umum jumlah nilai m_l dapat dituliskan $(2l+1)$.

4. Bilangan Kuantum Spin

Masih ada satu bilangan kuantum yang lain, yaitu bilangan kuantum spin m_s . Bilangan ini dikaitkan dengan sifat intrinsik momentum anguler elektron. Sifat-sifat ini disebut elektron spin. Ada dua jenis spin elektron yaitu spin ke atas dan spin ke bawah sehingga ada dua nilai kemungkinan. Analisis ini biasanya digunakan untuk dua garis spektrum yang sangat halus. Bilangan kuantum spin untuk elektron mempunyai dua nilai, yaitu $m_s = \pm (1/2)$ untuk setiap nilai m_l . Contoh: untuk nilai $l = 1$, ada tiga kemungkinan nilai m_l dan setiap nilai m_l mempunyai 2 nilai m_s . Jadi, untuk $l = 1$: $m_l = -1$, $m_s = \pm (1/2)$, $m_l = 0$, $m_s = \pm (1/2)$ dan $m_l = 1$, $m_s = \pm (1/2)$.

Secara keseluruhan ada empat bilangan kuantum yang dapat dilihat dalam tabel 9.1 dan dapat dilihat pada gambar 9.8.

Tabel 9.1 Bilangan Kuantum Atom Hidrogen

Bilangan Kuantum	Lambang	Nilai yang Diperbolehkan	Bilangan yang Diperbolehkan
Utama	n	1, 2, 3, 4, ..., n	Tidak terbatas
Orbital	l	0, 1, 2, 3, ..., $(n-1)$	n (untuk tiap n)
Magnetik	m_l	0, ± 1 , ± 2 , ± 3 , ..., $\pm l$	$2l + 1$ (untuk tiap l)
spin	m_s	$\pm(1/2)$	2 (untuk tiap m_l)

Pada gambar 9.3 menunjukkan tiga nilai untuk $n = 3$ yang mempunyai tiga sub kulit untuk $l = 0, 1$, dan 2 . Artinya, walaupun mempunyai nilai momemtum anguler yang berbeda, namun mempunyai energi yang sama. Besarnya nilai momentum anguler ditunjukkan dengan persamaan,

$$|L| = \frac{h}{2\pi} \sqrt{l(l+1)} \quad (9.15)$$

dan untuk L_z ,

$$L_z = m_l \frac{h}{2\pi} \quad (9.16)$$

Jadi untuk $m_l = -1$, nilai $L_z = -(h/2\pi)$, lihat gambar 9.8(b).

Pada gambar 9.8(c), 9.8(d) dan 9.8(e) elektron dapat melakukan gerakan spin ke atas dan spin ke bawah tergantung pada pengertian rotasi elektron.

Diskusikan

Gunakan persamaan 9.15 untuk mengitung besarnya nilai L pada elektron yang mengorbit pada $l = 1$ dan $l = 2$.

H. Atom dengan Banyak Elektron

Sejauh ini kita membicarakan tentang karakteristik dari atom hidrogen yang hanya mempunyai satu elektron dan satu proton. Bagaimanakah bentuk orbit elektron jika sebuah atom mempunyai lebih dari satu elektron dan proton? Tentunya akan lebih rumit karena adanya gaya tolak-menolak antara muatan yang sejenis. Namun satu hal yang menarik adalah bahwa energi tidak hanya

tergantung pada bilangan kuantum utama tetapi juga tergantung pada bilangan kuantum orbital. Ini memberikan pemikiran bahwa, pada satu tingkatan energi mempunyai sub-sub energi. Dalam bahasa yang berbeda, pada atom berelektron banyak maka konsep degenerasi yang ada pada atom hidrogen harus dicabut, dan energi orbit tergantung pada keempat bilangan kuantum.

Biasanya untuk tingkatan energi ke- n mengacu pada pengertian kulit atom dan untuk tingkatan l mengacu pada pengertian sub kulit. Jadi dalam satu kulit yang sama bisa ditempati lebih dari satu elektron. Biasanya $n = 1$ disebut kulit K ; $n = 2$, kulit L ; $n = 3$ disebut kulit M dan seterusnya. Begitu pula untuk nilai n dan l yang sama, pada subkulit tersebut kemungkinan ditempati elektron lebih dari satu, dikatakan elektron di sub kulit yang sama.

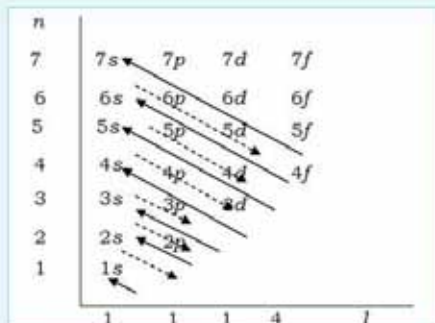
Sub kulit l ditandai dengan bilangan seperti yang telah dibicarakan sebelumnya. Sekarang untuk menandai sub kulit pada l menggunakan huruf, s, p, d, f, \dots yang berkaitan dengan nilai $l = 0, 1, 2, 3, \dots, 4, \dots$

Karena energi elektron secara langsung tergantung pada nilai n dan l maka keduanya sering digunakan untuk memberi tanda tingkatan energi (kulit dan subkulit).

Contoh,

1. $1s$ memberikan arti $n = 1$ dan $l = 0$,
2. $2p$ memberikan arti $n = 2, l = 1$,
3. $3d$ memberikan arti $n = 3, l = 2$ dan seterusnya.

Jika dikaitkan dengan bilangan kuantum magnetik dan spin maka pada kulit $n = 1$ sub kulit s akan terisi oleh 2 elektron, $n = 2$ sub kulit p akan terisi 6 elektron dan $n = 3$ sub kulit d akan terisi elektron 10. Pola pengisian elektron pada sub kulit bisa dilihat pada gambar 9.9.



Gambar 9.9 Hubungan ke empat bilangan kuantum

Prinsip Pauli

Sebenarnya keberadaan elektron pada atom berelektron banyak berada pada tingkatan posisi dasar. Hal ini ditunjukkan oleh Wolfgang Pauli, seorang fisikawan dari Austria (1928). Prinsip Pauli memberikan suatu larangan yang pada hakekatnya tidak ada dua elektron (dalam atom berelektron banyak) dapat menempati pada bilangan kuantum yang sama (n , l , m_l dan m_s). Jadi, tidak ada dua elektron yang dapat mempunyai kedudukan kuantum sama. Artinya bahwa setiap set bilangan kuantum (n , l , m_l dan m_s) berkaitan dengan perbedaan kedudukan kuantum, hanya dapat ditempati oleh satu elektron. Contoh untuk $1s$ ($n = 1$, $l = 0$) hanya dapat mempunyai satu nilai $m_l = 0$ dan hanya dengan dua nilai $m_s = \pm(1/2)$. Jadi untuk $1s$ hanya ada dua set bilangan kuantum yaitu $(1, 0, 0, 1/2)$ dan $(1, 0, 0, -1/2)$ sehingga hanya ada dua elektron yang mengisi pada tingkatan $1s$. Dalam keadaan seperti ini pada kulit $n=1$ terisi penuh. Semua elektron yang lain dilarang masuk berdasarkan aturan Pauli. Seperti atom Li yang mempunyai 3 elektron, satu elektron harus menempati kulit yang lebih atas yaitu pada tingkatan $2s$. Jadi konfigurasi elektron untuk Li: $1s^2 2s^1$

Contoh konfigurasi elektron yang lain adalah: (urutan cara pengisian elektron pada gambar 9.9),

1. fluorida (F) mempunyai 9 elektron : $1s^2 2s^2 3p^5$
2. neon (Ne) mempunyai 10 elektron : $1s^2 2s^2 3p^6$
2. natrium (Na) mempunyai 11 elektron : $1s^2 2s^2 3p^6 3s^1$

Untuk mengenal lebih jauh tentang konfigurasi elektron dalam sistem periodik unsur, kalian bisa lihat tabel 9.1.

Rangkuman

1. Atom menurut Demokritus adalah zat yang tidak dapat dibagi-bagi lagi.
2. Teori atom menurut John Dalton: Atom merupakan bagian terkecil dari suatu zat yang tidak dapat berubah menjadi atom yang lain dan beberapa atom yang bergabung dapat membentuk molekul/senyawa.
3. Teori atom menurut Thompson: Atom mempunyai dua muatan yang berlawanan jenis di seluruh positif dan muatan negatif yang tersebut merata di seluruh bagian atom. Jumlah kedua muatan tersebut sama sehingga atom bersifat netral.

4. Rutherford melakukan percobaan untuk meneliti atom dengan hamburan sinar alfa. Percobaan Rutherford ini memberikan teori atom yang berlaku.

5. Besarnya panjang gelombang yang dipancarkan oleh

spektrum atom hidrogen
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

di mana untuk

Deret Balmer $\rightarrow n_f = 2$

Deret Lyman $\rightarrow n_f = 1$

Deret Paschen $\rightarrow n_f = 3$

Deret Brackett $\rightarrow n_f = 4$

Deret Pfund $\rightarrow n_f = 5$

6. Besarnya energi elektron dalam mengorbit inti

$$E = E_k + U = E = E_k + U = \frac{1}{2} \frac{KC^2}{r_n} - \frac{KC^2}{r_n} = -\frac{KC^2}{2r_n}$$

7. Besarnya jari-jari orbit elektron dalam mengorbit inti:

$$R_n = 0,0529 n^2$$

8. Besarnya energi elektron yang tergantung pada bilangan

kuantum n :
$$E_n = \left(-\frac{13,6}{n^2} \right) eV$$

9. Energi eksitasi/de-eksitasi elektron adalah

$$\Delta E = 13,6 \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) eV$$

10. Bilangan kuantum dibedakan menjadi

- a. Bilangan kuantum utama (n)

$$n = 1, 2, 3, \dots$$

- b. Bilangan kuantum orbital (ℓ)

$$\ell = 0, 1, 2, \dots$$

- c. Bilangan kuantum magnetik (m_ℓ)

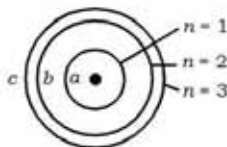
$$m_\ell = -\ell, \dots, 0, \dots, +\ell$$

- d. Bilangan kuantum spin (m_s)

12. Pada atom berelektron banyak harus mengikuti asas larangan pauli, yaitu tidak ada dua elektron yang menempati bilangan kuantum yang sama.

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

- Kelemahan model atom Bohr adalah
 - tidak dapat menjelaskan kestabilan atom
 - tidak dapat menjelaskan spektrum garis atom hidrogen
 - tidak dapat menjelaskan kuantisasi jari-jari energi total elektron
 - tidak dapat menjelaskan kuantisasi jari-jari orbit elektron
 - tidak dapat menjelaskan terpecahnya garis magnet luar
- Dalam postulat Bohr tentang momentum sudut P , panjang gelombang λ elektron yang bergerak dalam suatu orbit berjari-jari r memenuhi (n adalah bilangan bulat)
 - $r = n\lambda$
 - $2\pi r = n\lambda$
 - $2\pi r = n^2\lambda$
 - $r = l/n$
 - $2\pi r = l/n^2$
- Energi ionisasi sebuah atom adalah
 - energi yang diperlukan untuk memindahkan semua elektron ke tak berhingga
 - energi yang diperlukan untuk memindahkan semua elektron dalam kulit terluar ke tak berhingga
 - energi minimum yang diperlukan untuk memindahkan sebuah elektron ke tak berhingga
 - energi minimum yang diperlukan untuk memindahkan semua elektron dalam kulit terluar ke tak berhingga
 - energi minimum yang diperlukan untuk menambahkan sebuah elektron kepada atom
- Perhatikan gambar diagram tingkat energi atom hidrogen di bawah. Elektron pada lintasan dasar memiliki energi sebesar -13,6 eV. Atom hidrogen akan memancarkan foton dengan energi sebesar 10,2 eV bila elektron berpindah lintasan dari tingkat energi



- a. a ke b
 - b. b ke a
 - c. b ke c
 - d. c ke a
 - e. a ke c
5. Macam elektron yang tidak pernah ada adalah
 - a. elektron 4s
 - b. elektron 5s
 - c. elektron 2d
 - d. elektron 5d
 - e. elektron 2p
 6. Besarnya momentum sudut total untuk $m_l = 3$ adalah
 - a. $\frac{h}{2\pi}\sqrt{3}$
 - b. $\frac{h}{2\pi}\sqrt{6}$
 - c. $\frac{h}{2\pi}\sqrt{7}$
 - d. $\frac{h}{2\pi}\sqrt{10}$
 - e. $\frac{h}{2\pi}\sqrt{12}$
 7. Besar momentum sudut orbital elektron pada keadaan $n = 4$, maksimum adalah
 - a. $\sqrt{2}h$
 - b. $\sqrt{3}h$
 - c. $\sqrt{5}h$
 - d. $2\sqrt{3}h$
 - e. $2\sqrt{5}h$
 8. Dari konfigurasi elektron berikut yang melanggar prinsip larangan Pauli (asas Pauli) adalah
 - a. $1s^2 2p^5 3d$
 - b. $1s^1 2p^5 3d^3$
 - c. $1s^2 2p^7 3d^1$
 - d. $1s^1 2p^1 3d^8$
 - e. $1s^2 2p^1 3d^3$
 9. Perhatikan konfigurasi $1s^2 2s^2 2p^5 3s^2$. Kulit L ditempati oleh
 - a. 2 elektron
 - b. 4 elektron
 - c. 5 elektron
 - d. 7 elektron
 - e. 9 elektron

10. Sub kulit elektron dalam sebuah atom diberi label s , p , d . Salah satu kumpulan nilai-nilai yang tepat untuk jumlah maksimum elektron dalam sub kulit adalah . . .

	s	p	d
a.	2	6	10
b.	2	6	8
c.	2	8	18
d.	2	8	16
e.	2	8	10

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

- Pada atom hidrogen, untuk tingkat $n = 3$ tentukanlah:
 - jari-jari atomnya,
 - kecepatan elektronnya,
 - energi kinetik,
 - energi potensial,
 - energi total,
 - energi ionisasi,
- Sebuah elektron dalam atom hidrogen mula-mula dalam keadaan dasar kemudian menyerap foton, sehingga tereksitasi ke $n = 3$. Tentukan panjang gelombang dan frekuensi foton!
- Tentukan panjang gelombang terpanjang dan terpendek dalam deret Paschen!
- Berapakah nilai bilangan kuantum l yang mungkin dimiliki oleh sistem yang mempunyai bilangan kuantum utama $n = 5$?
- Tentukan harga-harga m_l dalam sub kulit:
 - $2p$!
 - $3d$!
 - $4p$!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab X

Relativitas Khusus



Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat memformulasikan teori relativitas khusus untuk waktu, panjang dan massa, serta kesetaraan massa dengan energi yang diterapkan dalam teknologi.

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Pengamat
2. Titik acuan
3. Waktu
4. Massa
5. Kecepatan

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

1. Relativitas Newton
2. Eksperimen Michelson-Morley
3. Transformasi Lorentz
4. Hubungan antara massa, momentum, dan energi relativistik

Relativitas berasal dari fenomena ketika kecepatan partikel/ benda mendekati kecepatan cahaya. Subjek tidak lagi dalam pembicaraan kinematika dan dinamika Newton karena kecepatan benda tidak bisa diamati langsung oleh manusia. Kalian bisa menghitung waktu atau menafsirkan kedatangan kendaraan bermotor yang mempunyai kecepatan 50km/jam dan menempuh

jarak 60 km. Bentuk lintasan atau pergerakan kendaraan bisa diamati langsung dengan mata. Namun apa yang terjadi jika partikel mengalami kecepatan mendekati kecepatan cahaya?

Ketika kelajuan mendekati kecepatan cahaya, pengukuran seperti panjang, massa, dan waktu mungkin mengalami suatu perubahan. Ini sulit kalian bayangkan jika sebuah benda mengalami perubahan sifat, seperti meteran kayu menjadi pendek, jarum jam nampak lebih lambat, massa benda bertambah. Apakah perubahan semua ini bisa diamati langsung oleh mata kalian? Ini sungguh suatu perubahan yang sangat drastis dalam pemikiran fisika yang menuntut kita untuk berfikir ulang tentang konsep ruang dan waktu.

Dalam bab ini kalian diajak untuk mempelajari bagaimana Einstein menjelaskan perubahan panjang dan waktu berdasarkan teori relativitas.

A. Relativitas Newton

Fisika telah mendeskripsikan fenomena fisis yang ada di sekitar kita yang kesemuanya tidak lepas dari pengamatan dan pengukuran. Tentu hasil yang diharapkan dari pengamatan dan pengukuran bersifat konsisten dan tidak bervariasi. Artinya, bahwa konsistensi ini bisa dipertahankan dari pengamatan ke pengamatan, sehingga bisa dijadikan standar, prinsip dan lebih tinggi lagi sebagai hukum alam. Dengan dijadikan prinsip hukum maka diharapkan siapa pengamat atau pengukurnya terhadap suatu objek akan mendapatkan hasil yang sama. Seperti hukum Newton tentang gerak, tidak hanya mempunyai hukum secara fisis, tapi dapat berlaku sampai sekarang dan siapa pengamatnya akan dihasilkan kesimpulan yang sama.

Ketika kalian membuat suatu pengukuran, kalian harus mengacu pada titik acuan yang digunakan sebagai referensi. Contoh, anggaplah kalian mengamati dua mobil yang melaju di jalan raya yang lurus dan datar dalam arah sama. Masing-masing mobil mempunyai kelajuan 50 km/jam dan 80 km/jam. Karena kalian dalam posisi diam di suatu tempat tentunya kelajuan kedua mobil tersebut diukur dalam kerangka acuan diam, dalam hal ini adalah kalian yang diam di permukaan bumi. Namun bagi orang yang duduk dalam mobil dengan kelajuan 50 km/jam akan mengamati kelajuan mobil yang ada didepannya dengan kelajuan 30 km/jam relatif terhadap penumpang mobil pertama. Apa yang

diamati oleh penumpang yang ada dalam mobil berkelajuan 80 km/jam? Secara umum bisa dikatakan bahwa apa yang diamati oleh seorang adalah sesuatu yang bersifat relatif. Sehingga kecepatan mobil pertama bersifat relatif terhadap kerangka acuan yang diam, sedang mobil kedua bisa dikatakan mempunyai kecepatan relatif terhadap kerangka yang diam atau kerangka yang bergerak, dalam hal ini kelajuan dari mobil yang pertama. Bagaimana dengan seorang penumpang atau sopir yang ada di dalam mobil?

Perhatikan gambar 10.1(a), seorang dalam suatu kerangka acuan (menumpang truk) yang bergerak dengan kecepatan konstan v' melempar bola dengan kecepatan v_b . Seorang pengamat yang diam akan mengatakan bahwa kecepatan bola adalah,

$$v = v' + v_b \quad (10.1a)$$

(relatif terhadap kerangka yang diam)

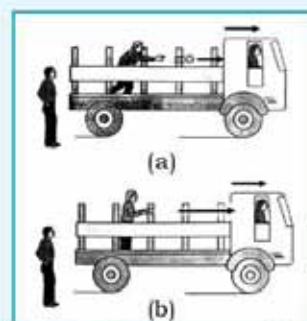
Jika truk mempunyai kelajuan 20m/s relatif terhadap pengamat yang diam dan bola mempunyai kelajuan 5m/s relatif terhadap truk dengan arah yang sama, maka bola mempunyai kelajuan 20 m/s + 5m/s = 25m/s relatif terhadap seorang pengamat yang diam.

Sekarang jika seorang penumpang truk menyalakan lampu senter dengan kelajuan c maka dengan analogi yang sama seorang pengamat yang diam di permukaan tanah akan mengamati kecepatan cahaya, lihat gambar 10.1(b) lebih besar dari $3,00 \times 10^8$ m/s, yaitu

$$v = v' + c \quad (10.1b)$$

Secara klasik pengukuran kecepatan cahaya mempunyai banyak nilai yang tergantung pada kerangka acuan yang dipakai. Hal ini bertentangan dengan teori relativitas bahwa kecepatan cahaya adalah konstan.

Pengukuran kecepatan relatif, nampaknya merupakan hal yang tidak "benar", karena kerangka acuan yang dianggap diam merupakan hal yang relatif terhadap yang lain. Bukankah bumi kita berotasi dan berevolusi?



Gambar 10.1 Kecepatan relatif

Namun kita harus membedakan suatu pengertian dari kerangka diam yang lebih dikenal sebagai kerangka inersia (ingat hukum I Newton) dan kerangka noninersia (ingat Hukum II Newton).

Karena analisis kita mengacu pada permukaan bumi yang mempunyai kelajuan (rotasi maupun evolusi) hampir konstan maka dalam pembicaraan selanjutnya selalu menggunakan kerangka inersia (diam atau bergerak dengan kelajuan konstan).

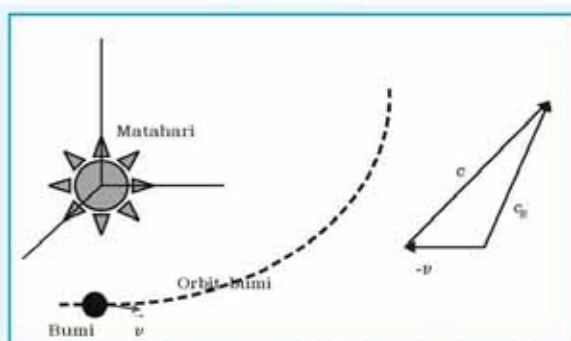
B. Ekperimen Michleson dan Morley (M-M)

Ekperimen ini bertujuan untuk menguji gerakan eter atau pergeseran terhadap bumi selama bumi berevolusi terhadap Matahari. Analisis pertama dikemukakan oleh Huygen bahwa cahaya sebagai gelombang merambat sampai ke permukaan Bumi memerlukan medium yang disebut eter sehingga bumi berevolusi terhadap matahari atau berotasi terhadap sumbunya selalu dilingkupi oleh eter. Seperti kalian pada saat naik pesawat, pergerakan pesawat dilingkupi oleh udara atau angin.

Jika cahaya merambat dalam eter dengan kecepatan v terhadap eter maka kecepatan cahaya terhadap bumi dapat diperoleh dari transformasi Galilean:

$$c_g = c - v$$

$$(10.2)$$



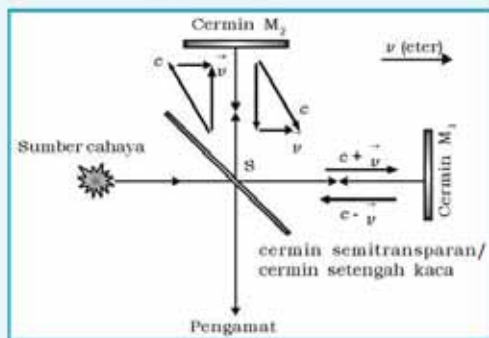
Gambar 10.2 Kerangka Heliosentris = kerangka diam untuk eter

di mana c_g adalah kecepatan cahaya terhadap bumi, c adalah kecepatan cahaya terhadap eter dan v adalah kecepatan eter terhadap bumi. Oleh karena itu kecepatan cahaya terhadap bumi bervariasi antara $c - v$ dan $c + v$, tergantung arah rambat cahaya.

Untuk membuktikan ada dan tidaknya eter, dapat dilakukan dengan percobaan Michelson-Morley. Percobaan ini menggunakan prinsip interferensi. Perhatikan gambar 10.3, cahaya berasal dari sumber dilewatkan pada cermin setengah kaca sehingga sebagian cahaya diteruskan ke cermin M_1 dan sebagian dipantulkan ke cermin M_2 .

Pada lintasan SM_1 kecepatan cahaya bertambah akibat adanya eter, menjadi $c + v$. Pada lintasan M_1S kecepatan cahaya berkurang menjadi $c - v$. Waktu yang dibutuhkan untuk menempuh lintasan $S-M_1-S$ adalah

$$t_1 = \frac{SM_1}{c+v} + \frac{M_1S}{c-v} = SM_1 \left(\frac{1}{c+v} + \frac{1}{c-v} \right) \\ = SM_1 \left(\frac{2c}{c^2 - v^2} \right)$$



Gambar 10.3 Skema percobaan Michelson - Morley

Pada lintasan SM_2 , cahaya harus diarahkan sedemikian hingga jatuh pada cermin M_2 sehingga kecepatannya adalah $\sqrt{c^2 - v^2}$. Hal yang sama berlaku untuk lintasan M_2S , maka waktu yang dibutuhkan untuk menempuh lintasan $S-M_2-S$ adalah

$$t_2 = \frac{SM_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} + \frac{SM_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2SM_2}{\sqrt{c^2 - v^2}}$$

Perbandingan $\frac{t_2}{t_1}$ adalah

$$\frac{t_2}{t_1} = \frac{\frac{2SM_2}{\sqrt{c^2 - v^2}}}{SM_1 \left(\frac{2c}{c^2 - v^2} \right)} = \frac{SM_1}{SM_2} \frac{\sqrt{c^2 - v^2}}{c} = \frac{SM_1}{SM_2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Pola interferensi konstruktif cahaya yang dipantulkan oleh cermin M_1 dan M_2 , hanya dapat terjadi apabila $t_1 = t_2$, sehingga

$$\frac{t_2}{t_1} = 1$$

$$1 = \frac{SM_1}{SM_2} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

apabila SM_1 dibuat sama dengan SM_2 maka

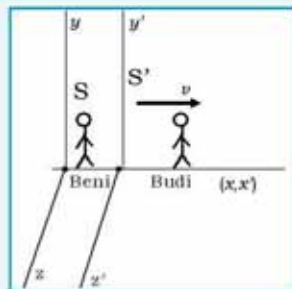
$$1 = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \rightarrow \frac{v^2}{c^2} = 0 \rightarrow v = 0$$

percobaan ini membuktikan bahwa eter tidak ada.

C. Transformasi Lorentz

1. Dilatasi Waktu

Usaha untuk menemukan alternatif percobaan Michelson - Morley tetap berpedoman pada postulat Einstein, yaitu kecepatan cahaya selalu konstan. Pada transformasi Lorentz kita anggap bahwa kerangka S' bergerak sepanjang sumbu x dengan kecepatan v terhadap S , lihat gambar 10.4!

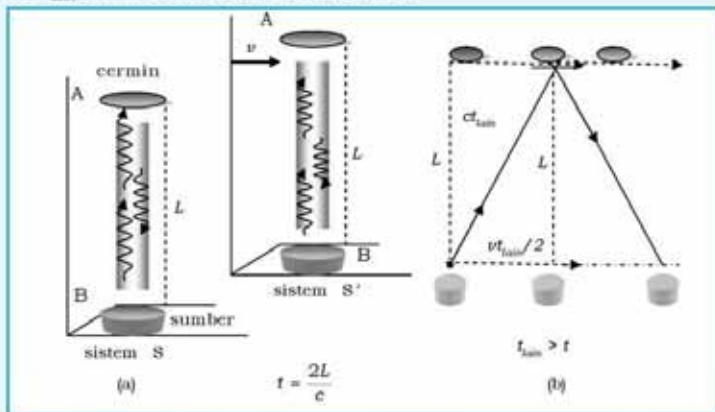


Gambar 10.4 Sistem koordinat S' bergerak dengan kecepatan v relatif terhadap koordinat S

Karena gerak kerangka S' hanya pada sumbu x maka $y = y'$ dan $z = z'$. Untuk memudahkan analisis ini, kita misalkan dua anak kembar bernama Beni dan Budi. Beni berada pada kerangka acuan S sedangkan Budi berada pada kerangka S' .

Beni dan Budi membawa tongkat sepanjang L yang pada kedua ujungnya dipasang cermin sehingga apabila cahaya jatuh pada cermin tersebut akan dipantulkan bolak-balik. Beni dan Budi memasang tongkat tersebut sepanjang sumbu $y = y'$. Masing-masing dari mereka menghitung waktu cahaya untuk menempuh AB

adalah, $t = \frac{2L}{c}$. Beni yang berada pada kerangka S menghitung cahaya pada tongkat yang dibawa budi dengan waktu lain, karena budi bergerak dengan kerangka S' terhadap S , lihat gambar 10.5(b)! Tentu t_{lain} akan lebih besar daripada t .



Gambar 10.5 a) Masing-masing pengamatan mempunyai waktu yang sama b) Lintasan cahaya yang telah diambil Budi terlihat oleh Beni

Gambar 10.5(b) menunjukkan lintasan cahaya pada tongkat Beni dan Budi. Lintasan cahaya lain adalah

$$\begin{aligned}
 L_{\text{lain}} &= \sqrt{L^2 + \left(\frac{vt_{\text{lain}}}{2}\right)^2} + \sqrt{L^2 + \left(\frac{vt_{\text{lain}}}{2}\right)^2} \\
 &= 2\sqrt{L^2 + \left(\frac{vt_{\text{lain}}}{2}\right)^2}
 \end{aligned}$$

akibatnya,

$$t_{\text{lain}} = \frac{L_{\text{lain}}}{c} = \frac{2}{c} \sqrt{L^2 + \left(\frac{vt_{\text{lain}}}{2}\right)^2}$$

$$t_{\text{lain}} \cdot c = 2 \sqrt{L^2 + \left(\frac{vt_{\text{lain}}}{2}\right)^2}$$

apabila kedua ruas dikuadratkan

$$t_{\text{lain}}^2 \cdot c^2 = 4 \left(L^2 + \frac{v^2 t_{\text{lain}}^2}{4} \right) \rightarrow t_{\text{lain}}^2 (c^2 - v^2) = 4 L^2$$

$$t_{\text{lain}} = \frac{2L}{\sqrt{c^2 - v^2}} \rightarrow t_{\text{lain}} = \frac{2L}{c \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \rightarrow t_{\text{lain}} = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (10.3)$$

Persamaan 10.3 disebut sebagai dilatasi waktu. Persamaan tersebut menunjukkan bahwa waktu yang lain berjalan lebih lambat

dengan faktor $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Faktor $\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$ diberi simbol γ memberikan nilai satu atau sama dengan satu.

Untuk meningkatkan kemampuan akademik dan personal kalian, kerjakanlah tugas berikut ini!

Tugas 10.1

1. A berada di dalam roket, dan B berada di bumi, keduanya mencocokkan jamnya (jam 12.00). Kemudian roket meninggalkan bumi dengan kecepatan $0,6c$
 - a. Jika A melihat jam di roket menunjukkan pukul 12.40, pukul berapakah saat itu menurut B?
 - b. Jika B melihat di bumi menunjukkan pukul 13.20, pukul berapa saat itu menurut A?
2. Dua anak kembar A dan B. A berkelana di antariksa dengan pesawat ruang angkasa berkecepatan $0,8c$. setelah 12 tahun berkelana A pulang ke bumi maka menurut B perjalanan A telah berlangsung berapa tahun?

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan sosial** kalian, lakukanlah kegiatan diskusi berikut!

Diskusikan

Kapan nilai γ sama dengan satu?

Perhitungan matematis memberikan kesesuaian dengan hasil eksperimen yang menunjukkan bahwa kelajuan relatif sama atau lebih besar dari kelajuan cahaya adalah suatu hal yang tidak mungkin.

Persamaan 10.3 dapat ditulis kembali,

$$t_{\text{bin}} = \gamma t$$

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal berikut!

Contoh Soal 10.1

Partikel muon mempunyai muatan sama dengan elektron, namun massa muon 200 kali lebih padat. Muon yang terbentuk dalam atmosfer bumi ketika sinar kosmik (sebagian besar adalah proton) dari angkasa luar bertumbukan dengan inti molekul-molekul gas dalam udara. Kemudian muon mendekati permukaan bumi dengan kecepatan $0,998c$. namun partikel muon tidak stabil, artinya partikel tersebut mudah berubah ke partikel lain. Masa hidup muon yang telah diukur di laboratorium $2,20 \times 10^{-6} \text{ s}$. Dengan waktu ini diharapkan muon berjalan dengan jarak, $d = v_0 t = (0,998c)(2,20 \times 10^{-6} \text{ s}) = 659 \text{ m}$

Karena muon terbentuk pada ketinggian 15-20 km maka dibandingkan dengan perjalanan muon yang hanya 0,650 km, kemungkinan kecil muon sampai ke permukaan bumi. Namun pada kenyataannya, partikel muon ada yang sampai di permukaan bumi. Jelaskan mengapa ini bisa terjadi? Gunakan analisis dilatasi waktu!

Penyelesaian:

Berdasarkan persamaan 10.3 maka kita tentukan dulu nilai γ

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{1}{\sqrt{1 - (0,998c/c)^2}} = 15,8$$

$t_{\text{kin}} = \gamma t$, muon menempuh jarak,

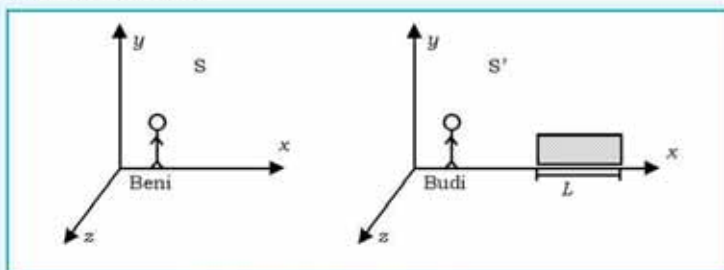
$$d = vt = \gamma vt$$

$$d = (15,8)(0,659\text{km}) = 10,4\text{km}$$

Jadi, jarak tempuh yang dianalisis lewat relativitas lebih besar dibanding dengan jarak tempuh secara klasik. Karena perhitungan tersebut adalah nilai rata-rata, beberapa muon menempuh jarak lebih besar dari 10,4 km. Sehingga muon bisa diamati sampai di permukaan bumi.

2. Kontraksi Panjang

Untuk membuktikan kontraksi panjang, kita akan membandingkan panjang suatu benda yang diamati oleh dua pengamat berbeda.



Gambar 10.6 Kontraksi panjang

Sebuah tongkat diam di kerangka acuan S' yang bergerak relatif terhadap S dengan kelajuan v . Budi mengukur panjang tongkat tersebut L . Beni berpendapat panjang tongkat tersebut tidak L melainkan L' . Sebagaimana yang telah kita bahas di depan, mengenai dilatasi waktu, waktu gerak budi menurut Beni adalah $t_{\text{kin}} = t \times \gamma$

Panjang tongkat menurut Beni adalah

$$L' = v \times t_{\text{kin}}$$

Panjang tongkat menurut Budi adalah

$$L = v \times t$$

Apabila L dibagi dengan L' didapatkan $\frac{L}{L'} = \frac{v \times t}{v \times t_{\text{kin}}} \rightarrow \frac{L}{L'} = \frac{t}{t \times \gamma}$

$$L = \gamma \times L'$$

$$\text{atau } L' = \frac{L}{\gamma} = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (10.4)$$

Persamaan 10.4 di atas disebut dengan kontraksi panjang.

Besarnya $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ pasti kurang dari 1, sehingga dapat disimpulkan bahwa panjang benda yang bergerak dengan mendekati kecepatan cahaya akan terlihat lebih pendek daripada panjang tongkat sesungguhnya.

Tugas 10.2

Sebuah roket ketika diam di bumi mempunyai panjang 100 m. Roket tersebut bergerak dengan kecepatan $0,8c$ (c = kecepatan udara di ruang vakum). Menurut orang di bumi berapa panjang roket tersebut selama bergerak?

Contoh Soal 10.2

Seorang pengamat melihat pesawat ruang angkasa, pada posisi pesawat diam mereka mengukur panjang pesawat 100m. Berapa saat kemudian pesawat bergerak dengan kelajuan konstan sebesar $0,700c$. Waktu yang diperlihatkan oleh jam pada pesawat tersebut adalah 2,00 s. a) Berapa panjang pesawat yang terukur oleh pengamat? b) Berapa interval waktunya?

Penyelesaian:

Panjang 100 m adalah panjang pesawat sebenarnya karena pesawat diukur saat masih diam terhadap pengamat. Interval waktu 2,00 s adalah waktu yang sebenarnya karena interval dari awal dan akhir diukur oleh jam dan lokasi yang sama. Dari ini bisa dituliskan.

Diketahui:

$$L = 100 \text{ m}$$

$$t = 2,00 \text{ s}$$

$$v = 0,700c$$

Ditanya:

- Kontraksi panjang (L')?
- Dilatasi waktu (t)?

Jawab:

- Berdasarkan persamaan 10.4 didapatkan nilai $\gamma = 1,4$ untuk $0,700c$ dan panjang kontraksi,

$$L' = \frac{L}{\gamma} = \frac{100 \text{ m}}{1,4} = 71,42 \text{ m}$$

- Berdasarkan persamaan 10.5, dilatasi waktu:

$$t_{\text{jam}} = \gamma t = 1,4 \times 2,00 \text{ s} = 2,80 \text{ s}$$

D. Hubungan antara Massa, Momentum, dan Energi Relativistik

1. Kecepatan Menurut Teori Relativitas

Sekarang kita dapat menurunkan secara penuh dari transformasi Lorentz. Perhatikan peristiwa yang terjadi pada posisi x dan waktu t dalam sistem S . Pengamat pada sistem S' beralasan sebagai berikut.

- Jika kedua jam diset pada titik nol, kemudian titik x tampak

pada mereka sebagai $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} x$

- Selama waktu interval t' , sistem S' bergerak dalam arah negatif x' dengan jarak vt' .

- Oleh karena itu, $x' = \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} x - vt'$ sehingga nilai x bisa didapatkan

$$x = \frac{x' + vt'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (10.5)$$

dengan sifat simetri, kita dapat juga mengatakan bahwa,

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (10.6)$$

Kombinasi persamaan (10.5) dan (10.6),

$$t = \frac{t' + (v/c^2)x'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (10.7)$$

dan

$$t' = \frac{t - (v/c^2)x}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (10.8)$$

Dari persamaan 10.5 - 10.8 dapat diturunkan kecepatan benda yang bergerak u pada sistem koordinat S dan u' untuk benda yang bergerak dalam sistem koordinat S'. Koordinat S' bergerak dengan

kecepatan v sepanjang sumbu x sehingga diperoleh $u'_x = \frac{dx'}{dt'}$

a. Persamaan 10.6 secara matematika dapat dituliskan,

$$dx' = \frac{dx - vdt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

b. Persamaan (10.8) secara matematika dapat dituliskan,

$$dt' = \frac{dt - (v/c^2)dx}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - vdt}{dt - (v/c^2)dx}$$

atau

$$u'_x = \frac{u_x - v}{1 - (v/c^2)u_x} \quad (10.9)$$

Dengan cara yang sama kalian dapat membuktikan kecepatan untuk komponen y dan z ($y' = y$ dan $z' = z$),

$$u'_y = \frac{dy'}{dt'} = \frac{1}{\gamma} \frac{u_y}{1 - (v/c^2)u_x} \quad (10.10)$$

dan

$$u'_z = \frac{dz'}{dt'} = \frac{1}{\gamma} \frac{u_z}{1 - (v/c^2)u_x} \quad (10.11)$$

Hal yang menarik pada persamaan 10.9 adalah hubungan antara u'_x dan u_x di mana sebelum adanya teori relativitas hanya berlaku persamaan $u'_x = u_x - v$. Jadi jika ada sebuah partikel bergerak $u'_x = (-3/4)c$ dan sistem koordinat S' bergerak ke arah sumbu x positif dengan kecepatan $(3/4)c$, kita mendapatkan bahwa kecepatan partikel yang diamati oleh pengamat di S' adalah $1,5c$. Namun dengan menggunakan persamaan 10.9 kalian akan mendapatkan kecepatan partikel yang diamati oleh pengamat di S' adalah $(-24/25)c$. Hal ini sesuai dengan postulat Einstein, nilai $|u'_x|$ tidak lebih besar dari nilai c .

2. Massa Menurut Teori Relativitas

Manfaat langsung dari penggunaan teori relativitas adalah analisis untuk fisika partikel yang mempunyai kelajuan partikel mendekati dengan kelajuan cahaya. Analisis kecepatan di atas sangat memungkinkan dipakai pada akselerator. Akselerator adalah alat yang digunakan untuk mempercepat partikel sehingga kecepatannya mendekati kecepatan cahaya. Dari pembahasan di atas ternyata hasil yang diperoleh dengan analisis Newton tidak sesuai lagi manakala partikel dipercepat dengan kecepatan cahaya. Massa yang menurut teori klasik bersifat konstan, dalam analisis relativitas akan berubah menjadi,

$$m' = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 \quad (10.12)$$

KISI

Partikel-partikel seperti elektron dapat dibuat agar melaju sangat cepat dalam sebuah akselerator, seperti akselerator bundar ini di Fermilab, Illinois, AS. Partikel-partikel itu dipacu dengan memanfaatkan medan magnet. Semakin besar energi yang diberikan oleh medan-medan magnet pada partikel, semakin cepat partikel-partikel itu melaju. Kecepatan tambahan yang berhasil diperoleh partikel-partikel itu tidak pernah cukup untuk melaju lebih cepat daripada kecepatan cahaya, sebab tidak ada benda yang dapat melesat secepat cahaya. Setiap energi tambahan membuat partikel bertambah berat. Pengaruh-pengaruh ini telah diperkirakan oleh Einstein.



Sumber : jendela iptek 13

di mana m_0 adalah massa diam dari suatu partikel atau benda dan m' disebut massa relativitas partikel dan besarnya lebih besar dari m_0 karena $\gamma > 1$. Massa diam adalah massa yang diukur oleh pengamat diam terhadap partikel.

3. Energi menurut Teori Relativitas

Einstein menunjukkan bahwa energi kinetik pada kelajuan yang sangat tinggi diberikan oleh persamaan yang berbeda dengan energi kinetik pada fisika klasik. Dalam teori relativitas, besarnya energi kinetik diberikan oleh,

$$E_k = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) m_0 c^2 = (\gamma - 1) m_0 c^2 \quad (10.13)$$

Berdasarkan persamaan 10.12 dan 10.13 jika kecepatan partikel mendekati cahaya maka massa dan energi kinetiknya mendekati tak terhingga. Dasar dari teori relativitas khusus mengatakan, tidak ada benda yang dapat bergerak dengan kecepatan sama dengan kecepatan cahaya. Hal ini nampak pada kedua persamaan tersebut.

Untuk memberlakukan benda dengan kecepatan $v = c$ diperlukan energi kinetik tak terhingga. Hal yang sama untuk dilatasi waktu dan kontraksi panjang, juga merupakan contoh dari kasus seperti ini. Artinya, bahwa kerangka acuan bisa bergerak dengan kelajuan c , sehingga interval waktunya menjadi tak terhingga, sedang untuk panjang benda menjadi nol.

4. Momentum menurut Teori Relativitas

Dalam teori relativitas, definisi momentum juga berubah untuk mempertahankan berlakunya hukum kekekalan momentum. Hukum kekekalan momentum tetap berlaku dalam teori relativitas jika persamaannya adalah,

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 v \quad (10.14)$$

Dalam mekanika klasik, energi mekanik total adalah $E_t = E_k + E_p$. Jika tidak ada energi potensial maka $E_t = E_k$. Sehingga secara sederhana bahwa energi total sama dengan energi kinetik jika

energi potensial sama dengan nol.

$$\begin{aligned} E_k &= (\gamma - 1)m_0c^2 = \gamma m_0c^2 - m_0c^2 = mc^2 - m_0c^2 \\ mc^2 &= E_k + m_0c^2 \end{aligned} \quad (10.15)$$

Ruas kanan dari persamaan 10.15 terdiri dari dua variabel, yaitu energi kinetik ditambah besaran m_0c^2 yaitu sebagai fungsi massa benda diam. Ini berarti walaupun benda itu diam sehingga energi kinetiknya sama dengan nol, tetap masih mempunyai energi sebesar m_0c^2 . Ini adalah energi yang selalu dimiliki oleh benda dan disebut sebagai energi diam E_0 .

$$E_0 = m_0c^2 \quad (10.16)$$

Jika energi potensial sama dengan nol maka persamaan 10.15 dapat ditulis kembali,

$$E = E_k + m_0c^2 = mc^2 \quad (10.17)$$

Jika partikel mempunyai energi potensial U , maka persamaan 10.17 menjadi,

$$E = E_k + U + m_0c^2 \quad (10.18)$$

Hubungan antara energi total dengan energi diam dapat diperoleh dengan mengalikan c^2 pada persamaan 10.18,

$$\begin{aligned} m'c^2 &= \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0c^2 \\ E &= \gamma E_0 \end{aligned} \quad (10.19)$$

Diskusikan

Berdasarkan persamaan 10.19, syarat apa yang harus kalian pikirkan untuk mendapatkan $E = E_0$?

Contoh Soal 10.3

1. Berapa banyak energi yang diperlukan untuk menggerakkan elektron dari posisi diam sehingga elektron melaju dengan kelajuan $0,900c$?
2. Berapa energi yang dibutuhkan jika dihitung dengan teori klasik?

Penyelesaian:

Data yang bisa didapatkan adalah:

Diketahui:

$$v = 0,900c$$

Ditanya:

- Kerja yang diperlukan untuk elektron bergerak sampai $0,900c$?
- Energi kinetik non relativitas?

Jawab:

- Untuk menjawab ini perlu mengetahui energi diam E_0 dari elektron,

$$E_0 = m_0 c^2 = (9,109 \times 10^{-31} \text{ kg})(2,998 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 8,187 \times 10^{-14} \text{ J}$$

atau

$$E_0 = 8,187 \times 10^{-14} \text{ J} \left(\frac{1 \text{ eV}}{1,602 \times 10^{-19} \text{ J}} \right) = 0,511 \text{ MeV}$$

Energi yang diperlukan oleh elektron untuk bergerak dengan kelajuan $0,900c$ secara relativitas di mana untuk $v = 0,900c$ harga $\gamma = 2,29$:

$$E_k = (\gamma - 1)m_0 c^2 = (2,29 - 1)5,11 \text{ MeV} = 0,659 \text{ MeV}$$

Jadi, untuk memberikan energi ke elektron agar dapat melaju sebesar $0,900c$ diperlukan energi sebesar $0,659 \text{ MeV}$

- Untuk menghitung besarnya energi nonrelativitas kita

$$\text{gunakan persamaan, } E_k = \frac{1}{2} m_0 v^2 = \frac{1}{2} m_0 c^2 \frac{v^2}{c^2} = 0,207 \text{ MeV}$$

Jadi energi yang diperlukan terlalu kecil dibanding dengan nilai yang diperhitungkan secara relativitas. Secara eksperimen nilai ini tidak sesuai.

Untuk meningkatkan **kemampuan sosial dan akademik** kalian, kerjakan tugas di bawah ini!

Tugas 10.3

- Suatu piring terbang bergerak arah x dengan laju $0.8c$ terhadap sistem koordinat O yang diam di tanah. Dari piring terbang ditembakkan peluru dengan laju $0.6c$ searah dengan piring terbang. Berapa laju peluru tersebut bila diukur dari tanah?

2. Seorang pengamat di titik O sedang mengamati dua pesawat ruang angkasa yang saling mendekati dari arah yang berlawanan, masing-masing pesawat itu mempunyai kecepatan $0.9c$ relatif terhadap O.
 - a. Gambarkan kejadian tersebut! Bila arah pesawat A bernilai positif maka:

$$v_{AO} = \dots$$

$$v_{BO} = \dots$$
 - b. Berapa kecepatan titik O relatif terhadap pesawat B menurut penglihatan seseorang di pesawat B? Petunjuk: apakah yang dicari v_{OB} atau v_{BO} ?
 - c. Berapakah kecepatan pesawat A relatif terhadap pesawat B menurut penglihatan seseorang di pesawat B?
 - d. Berapa kecepatan pesawat A relatif terhadap B menurut pengamatan seseorang di O? Petunjuk: Apakah disini masih berlaku penjumlahan relativitas?
3. Sebuah benda mempunyai massa diam 2 kg. Bila bergerak dengan kecepatan $0.8c$ (c = kecepatan cahaya), berapakah massa menurut pengamat yang diam?
4. Sebuah elektron dalam keadaan diam massanya 9.1×10^{-31} kg. Dengan kecepatan berapa elektron tersebut bergerak agar massanya menjadi 2 kali lipat?
5. Massa sebuah elektron yang bergerak adalah 10 kali lipat dan massa diamnya. Berapa m/s kecepatan elektron itu?
6. Jika energi total proton adalah tiga kali energi diamnya.
 - a. Tentukan energi diam proton!
 - b. Berapa kelajuan proton?
 - c. Tentukan energi kinetik proton dalam eV!
($m_p = 1.67 \times 10^{-27}$ kg)!

Rangkuman

1. Percobaan Michelson-Morley bertujuan untuk membuktikan tentang keberadaan eter di alam semesta ini.

2. Besarnya waktu menurut teori relativistik adalah:

$$t_{\text{kin}} = \frac{t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma t$$

3. Dilatasi panjang menurut teori relativitas adalah:

$$L' = \frac{L}{\gamma} = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

4. Kecepatan benda menurut teori relativitas adalah:

$$u' = \frac{u - v}{1 - (v/c^2)u}$$

5. Massa benda menurut teori relativistik adalah:

$$m' = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0$$

6. Energi kinetik benda menurut teori relativistik adalah:

$$E_k = \left(\frac{1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - 1 \right) m_0 c^2 = (\gamma - 1) m_0 c^2$$

7. Momentum benda menurut teori relativistik adalah:

$$p = \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma m_0 v$$

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

- Sebuah kereta bergerak dengan kecepatan 20 m/s . Seorang anak berlari di dalam kereta dengan kecepatan 1 m/s , searah dengan arah kereta. Pernyataan yang benar adalah....
 - kecepatan anak terhadap bumi adalah 1 m/s
 - kecepatan anak terhadap bumi adalah 19 m/s
 - kecepatan anak terhadap bumi adalah 21 m/s
 - kecepatan anak terhadap kereta adalah 20 m/s
 - tidak ada jawaban yang benar
- Perbandingan dilatasi waktu untuk sistem yang bergerak pada kecepatan $0,6c$ dengan sistem yang bergerak dengan kecepatan $0,8c$ adalah....

a. $3 : 4$	d. $16 : 9$
b. $4 : 3$	e. $9 : 16$
c. $9 : 2$	
- Berikut yang merupakan hasil dari percobaan Michelson-Morley adalah....
 - besarnya kecepatan cahaya berubah-ubah tergantung pada titik acuan
 - besarnya kecepatan cahaya selalu konstan
 - cahaya bergerak dengan medium eter
 - bumi bergerak dalam medium eter
 - eter tidak ditemukan/tidak ada
- Berikut yang merupakan postulat Einstein adalah....
 - massa benda tidak konstan
 - waktu diam dan waktu bergerak benda tidak sama
 - panjang benda yang bergerak dengan benda yang diam tidak sama
 - kecepatan cahaya dalam vakum yang dipancarkan oleh sumber diam dan bergerak tidak sama
 - pernyataan di atas benar semua
- Rani dan Rina adalah anak kembar, keduanya berumur 25 tahun. Rani bergerak ke suatu planet yang jaraknya 3 tahun cahaya (1 tahun cahaya adalah jarak yang ditempuh cahaya selama 1 tahun) dengan kecepatan $0,6c$. Setelah tiba disana, ia kembali lagi ke bumi. Umur Rani dan Rina setelah mereka bertemu kembali adalah....

- a. 35 tahun dan 33 tahun
 - b. 33 tahun dan 35 tahun
 - c. 30 tahun dan 33 tahun
 - d. 33 tahun dan 35 tahun
 - e. 30 tahun dan 35 tahun
6. Sebuah kubus berada pada pusat koordinat mempunyai volume 8 liter. Volume kubus tersebut apabila dilihat oleh pengamat yang bergerak ke arah sumbu x dengan kecepatan $0,6c$ adalah
- a. 6,4 liter
 - b. 4,1 liter
 - c. 5,2 liter
 - d. 8 liter
 - e. 9,2 liter
7. Agar energi kinetik benda bernilai 25% energi diamnya dan c adalah kelajuan cahaya dalam ruang hampa maka benda harus bergerak dengan kelajuan
- a. $c/4$
 - b. $c/2$
 - c. $3c/5$
 - d. $3c/4$
 - e. $4c/5$
8. Sebuah baut mempunyai massa diam m_0 bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya sehingga massanya menjadi $1\frac{1}{4}$ kali massa diamnya. Jika kecepatan cahaya c maka energi kinetik benda itu adalah ...
- a. $0,25 m_0 c^2$
 - b. $0,5 m_0 c^2$
 - c. $m_0 c^2$
 - d. $1,25 m_0 c^2$
 - e. $1,5 m_0 c^2$
9. Kecepatan sebuah benda yang memiliki energi kinetik 5 kali energi kinetik diamnya adalah....
- a. $\frac{2c}{5}\sqrt{6}$
 - b. $\frac{5c}{2}\sqrt{6}$
 - c. $\frac{1}{2}c$
 - d. $\frac{3}{4}c$
 - e. $\frac{4}{3}c$
10. Suatu batang bergerak dengan kecepatan $\frac{5}{13}c$ searah memanjangnya. Jika panjang batang 26 cm maka panjang batang yang diamati oleh pengamat yang diam adalah....
- a. 0,2cm
 - b. 2cm
 - c. 4cm
 - d. 22cm
 - e. 24cm

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Partikel A bergerak dengan kelajuan $0,5c$ ke arah barat. Sebuah partikel B bergerak dengan kelajuan $0,2c$ ke arah barat. Tentukan kelajuan relatif partikel A dengan kelajuan partikel B:
 - a. Menurut Einstein!
 - b. Menurut Newton!
2. Seorang pengamat di bulan melihat dua pesawat angkasa luar A dan B mendekati bulan dalam arah yang berlawanan masing-masing dengan kelajuan $0,8c$ dan $0,9c$.
 - a. Berapakah kelajuan bulan mendekati pesawat A menurut pengamat dalam pesawat A?
 - b. Berapakah kelajuan B terhadap A menurut pengamat dalam pesawat A?
 - c. Berapakah kelajuan bulan mendekati pesawat B menurut pengamat dalam pesawat B?
 - d. Berapakah kelajuan A terhadap B menurut pengamat dalam pesawat B?
3. Sebuah partikel dalam keadaan diam umurnya $2,6 \times 10^{-8} \text{ s}$, sebelum berubah menjadi bentuk lain. Hitung umur partikel itu bila bergerak terhadap pengamat di bumi dengan kelajuan $2,7 \times 10^8 \text{ m/s}$!
4. Setiap detik di matahari terjadi perubahan $4 \times 10^9 \text{ kg}$ materi menjadi energi radiasi. Bila laju cahaya dalam vakum adalah $3 \times 10^{10} \text{ cm/s}$ maka hitung daya yang dipancarkan oleh matahari!
5. Sebuah roket bergerak dengan kecepatan $0,6c$. Hitunglah penyusutan pesawat apabila dilihat oleh pengamat yang diam!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Bab XI

Inti Atom dan Radioaktivitas

Tujuan pembelajaran

Setelah mengikuti pembahasan dalam bab ini, kalian dapat mengidentifikasi karakteristik inti atom dan radioaktivitas serta dapat mendeskripsikan pemanfaatan radioaktif dalam teknologi dan kehidupan sehari-hari

Kata kunci dalam memahami materi bab ini adalah:

1. Elektron
2. Proton
3. Energi

Ruang lingkup pembahasan dalam bab ini mencakup

1. Model atom menurut Demokritus, Dalton, Thompson, Rutherford, dan Bohr
2. Tingkatan energi elektron
3. Hipotesa de Broglie
4. Atom dengan banyak elektron

Model inti atom telah diperkenalkan sejak tahun 1911. Namun pada waktu itu belum banyak diketahui tentang inti maka tetap merupakan tantangan para ilmuwan untuk mengetahui apa sebenarnya yang ada dalam inti atom.

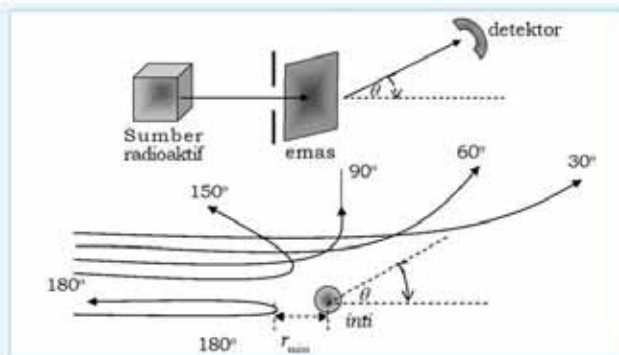
Satu fenomena yang menarik adalah terjadinya peluruhan inti (radioaktif). Beberapa inti mengalami peluruhan dan berubah menjadi inti baru. Inti yang demikian disebut inti yang tidak stabil. Emisi dari peluruhan inti dapat terdeteksi dan sangat berbahaya bagi kesehatan, namun bila dapat dikendalikan sangat berguna untuk penyembuhan penyakit kanker dan dapat dimanfaatkan

untuk keperluan lain, misalkan untuk bidang pertanian. Dengan kata lain, emisi dari inti atom merupakan energi yang dapat dimanfaatkan untuk meningkatkan kesejahteraan hidup.

A. Struktur dan Gaya Inti

Satu bukti nyata bahwa emisi elektron dari sebuah filamen yang dipanaskan dan fenomena efek fotolistrik menunjukkan bahwa atom-atom suatu material berisi elektron-elektron. Karena atom secara normal mempunyai muatan netral maka dalam atom pasti ada muatan lain yang merupakan muatan positif untuk menetralkan elektron. Muatan positif yang menetralkan elektron disebut proton dan yang besarnya sama dengan muatan elektron tetapi tandanya berlawanan. Oleh sebab itu, atom terdiri dari elektron dan proton. Massa atom didominasi oleh massa proton karena massa elektron sangat kecil dibandingkan massa proton. Dengan demikian, massa atom sebanding dengan massa proton yang terkonsentrasi dalam inti atom dan dikelilingi oleh orbit elektron. (Ingat model atom Rutherford yang disempurnakan oleh Bohr sehingga disebut model atom Rutherford-Bohr).

Analisis lebih mendalam dapat diperoleh dari percobaan Rutherford yang menggunakan partikel alpha (α). Partikel alfa yang mempunyai dua muatan positif adalah hasil peluruhan radioaktif secara alami dari zat radioaktif. Bila berkas sinar alfa ditembakkan pada lempeng emas yang tipis, ternyata berkas sinar tersebut dihamburkan ke segala arah sebagai fungsi sudut.



Gambar 11.1 Hamburan Rutherford

Partikel alfa mempunyai massa 7000 kali lebih padat daripada elektron. Sehingga yang dimodelkan oleh Thompson hanya memberikan penyimpangan kecil setelah terjadi tumbukan antara elektron dan alfa. Namun hasil dari pengamatan Rutherford sangat mengejutkan karena ada partikel alfa yang dipantulkan 180° walaupun kemungkinannya sangat kecil (1:8000). Model yang diajukan oleh Rutherford dapat dilihat pada gambar 11.1

Hasil analisis Rutherford berdasarkan data yang ditunjukkan pada gambar 11.1 adalah:

- hamburan partikel alfa yang membentuk sudut 180° merupakan hasil tumbukan tunggal. Ini bisa terjadi jika massa yang ditumbuk lebih besar maka ia beranggapan pusat massa dari atom berada pada pusat atom.
- Jika semua muatan positif atom target (emas) terkonsentrasi dalam daerah yang kecil dalam atom maka partikel alfa yang datang mendekati daerah tersebut akan dibelokkan. Oleh karena itu, massa inti lebih besar dari partikel alfa.
- Perhitungan untuk mendapatkan harga r_{min} pada saat terjadi tumbukan langsung, di mana partikel alfa mendekati inti akan dibelokkan pada jarak r_{min} , karena mendapat gaya tolak sebagai konsekuensi dari hukum Coulomb. Jika distribusi muatan titik berbentuk bola maka potensial listriknya sebesar $V = kZe/r$, dimana Z adalah nomor atom atau jumlah proton dalam inti, dan Ze adalah muatan total inti. Kerja yang dilakukan oleh gaya Coulomb untuk menghentikan partikel alfa adalah $W = qV = 2eV$ (karena partikel alfa mempunyai dua muatan positif). Kerja yang dilakukan ini sama dengan energi kinetiknya,

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{(2e)kZe}{r_{min}} \quad \text{dan} \quad r_{min} = \frac{4kZe^2}{mv^2} \quad (11.1)$$

Dengan mengetahui energi kinetik partikel alfa, nomor atom target dan besaran-besaran lain lewat data percobaan, didapatkan $r_{min} = 10^{-12}$ cm. Nilai ini sedikit di atas batas nilai jari-jari inti (orde 10^{-13} cm), karena partikel alfa tidak langsung mengenai inti.

Satu hal yang menarik bahwa inti atom terdiri dari dua jenis partikel, yaitu proton dan neutron. Kecuali untuk atom hidrogen yang inti atomnya hanya berisi satu proton. Neutron tidak mempunyai jenis muatan, jadi bersifat netral. Perhitungan secara kasar untuk jari-jari inti adalah perbandingan jumlah proton dan neutron terhadap volume inti, secara matematis dinyatakan sebagai

$$\frac{\sum \text{proton} + \sum \text{neutron}}{\text{volume inti}} = \frac{A}{\frac{4}{3}\pi R^3} \approx \text{konstan}$$

Jadi,

$$A \approx R^3 \rightarrow R = R_0 A^{1/3} \quad (11.2)$$

dimana R_0 adalah nilai konstanta yang dapat ditentukan lewat eksperimen dan besarnya adalah $1,2 \times 10^{-15}$ m atau sekitar $(1,0-1,5)10^{-15}$ m. Panjang 10^{-15} m disebut 1 femtometer (fm).

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal di bawah ini!

Contoh Soal 11.1

Hitung jari-jari inti dari atom karbon ($A = 12$).

Penyelesaian:

Diketahui:

$A = 12$

$R_0 = 1,2$ fm

Ditanya: R ?

Jawab:

$R = (1,2 \text{ fm}) \times (12)^{1/3} = 2,7 \text{ fm}$.

1. Gaya Inti

Kita mengetahui tentang adanya gaya gravitasi antara proton dan neutron dalam inti. Namun gaya ini sangat kecil dibandingkan dengan gaya elektrostatis, yaitu tolak-menolak antara dua muatan positif. Sehingga kalian akan membayangkan bahwa dalam inti atom partikel-partikel berhamburan. Namun pada kenyataannya bentuk inti ada yang stabil maka dalam inti pasti ada gaya lain yang kuat. Gaya kuat inti inilah yang dapat menyatukan antara proton-proton dan neutron.

Secara umum sifat gaya yang ada pada inti atom adalah:

- Gaya inti atom adalah gaya tarik-menarik yang sangat kuat dibandingkan gaya elektrostatis atau gravitasi.
- Gaya inti mempunyai jangkaun yang sangat pendek yaitu dalam orde femtometer.
- Gaya inti bekerja pada jarak yang dekat antara dua proton, proton dan neutron, atau dua neutron.

2. Simbol Inti Atom

Untuk membedakan satu inti atom dari atom-atom yang lain digunakan simbol seperti,



di mana X adalah nama atom, A adalah nomor massa = jumlah proton (Z) ditambah jumlah neutron (N). Jadi $A = Z + N$. Jumlah proton sama dengan jumlah elektron sehingga Z juga menunjukkan jumlah elektron. Contoh: untuk atom karbon dengan simbol ${}^{12}_6\text{C}$. Dari simbol atom karbon C dapat diperoleh informasi bahwa banyaknya proton $Z = 6$, elektron 6, jumlah proton dan neutron $A = 12$ maka jumlah neutron $N = (12 - 6) = 6$.

Satu elemen atau unsur bisa mempunyai jumlah proton yang sama, tetapi jumlah neutron berbeda, contoh: ${}^{12}_6\text{C}$, ${}^{13}_6\text{C}$, ${}^{14}_6\text{C}$.

Dari contoh dapat dilihat bahwa untuk atom karbon mempunyai jumlah proton yang sama namun jumlah neutronnya berbeda, masing-masing adalah 6, 7, dan 8. Elemen seperti ini disebut isotop. Hidrogen mempunyai isotop: ${}^1\text{H}$ disebut hidrogen, ${}^2\text{H}$ disebut deuterium, dan ${}^3\text{H}$ disebut tritium dan bersifat tidak stabil.

3. Isotop, Isobar, dan Isoton

Isotop adalah unsur yang mempunyai nomor atom sama tetapi nomor massa yang berbeda. Isotop-isotop memiliki sifat kimia sama (karena nomor atomnya sama) tetapi memiliki sifat fisik berbeda. Contoh Isotop adalah Isotop unsur hidrogen: ${}^1\text{H}$ = hidrogen, ${}^2\text{H}$ = deuterium, ${}^3\text{H}$ = tritium.

Mengapa atom-atom dari unsur yang sama, bisa mempunyai nomor masa yang berbeda? Hal ini disebabkan karena perbedaan jumlah neutron yang terdapat dalam inti atomnya, dan massa atom lebih ditentukan dari jumlah massa proton + jumlah massa neutronnya. Sementara jumlah elektronnya diabaikan. Massa dari Isotop dapat ditentukan dengan alat spektrograf massa.

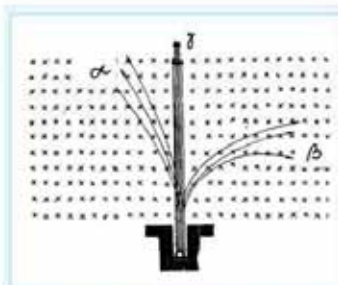
Selain Isotop, dikenal pula Isobar dan Isoton. Isobar adalah unsur yang mempunyai nomor massa sama tetapi nomor atom berbeda. Contoh Isobar ${}^{14}_7\text{N}$ dengan ${}^{14}_6\text{C}$. Isoton adalah unsur yang mempunyai jumlah netron yang sama. Contoh Isoton ${}^{23}_{11}\text{Na}$ dengan ${}^{24}_{12}\text{Mg}$.

B. Radioaktivitas

Sebagian besar elemen atau unsur mempunyai bentuk isotop yang stabil. Namun sebaliknya, sebagian elemen yang lain mempunyai isotop yang tidak stabil. Isotop yang tidak stabil mengalami peluruhan secara spontan. Isotop seperti ini disebut zat radioaktif. Contoh: isotop dari hidrogen yaitu tritium mempunyai inti yang bersifat radioaktif. Radioaktivitas mengacu pada pengertian memancarkan atau mengemisi. Dalam konteks fisika modern, ada dua kemungkinan yang di emisi, yaitu sebagai gelombang atau partikel. Aktif berarti isotop dari suatu elemen bersifat aktif memancarkan energi gelombang atau energi partikel.

Unsur radioaktif pertama kali ditemukan oleh seorang ilmuwan Perancis yang bernama Henri Becquerel. Pada tahun 1896 beliau sedang mempelajari sifat fluoresensi dari uranium. Becquerel menemukan plat fotografi menjadi berwarna hitam ketika uranium dalam posisi tidak aktif maka seharusnya tidak terjadi fluoresensi. Oleh sebab itu, hitamnya plat fotografi dimungkinkan adanya tipe radiasi lain yang disebabkan oleh uranium. Pada tahun 1893, Pierre dan Marie Curie mengumumkan penemuannya dua elemen radioaktif, yaitu radium dan polonium, dan mereka telah mengisolasi dari pengaruh uranium.

Hasil penelitian selanjutnya, jika elemen radioaktif diletakkan dalam suatu tempat (seperti kotak), hasil emisi dilewatkan melalui medan magnet akan didapatkan titik-titik hitam yang posisinya tidak sama. Arah radiasi ada yang dibelokkan ke kanan, ke kiri dan sebagian radiasi tidak terbelokkan. Ketiga jenis radiasi tersebut diketahui sebagai partikel beta (arah ke kanan), partikel alfa (arah ke kiri) dan partikel gamma (tidak terbelokkan). Ini membuktikan bahwa partikel yang terbelokkan mempunyai muatan (alfa dan beta) sedang partikel gamma tidak mempunyai muatan (sebagai sinar foton), lihat gambar 11.2.

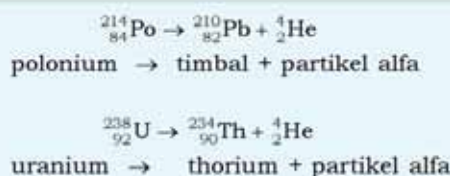


Gambar 11.2 Radiasi inti

1. Peluruhan Alfa (α)

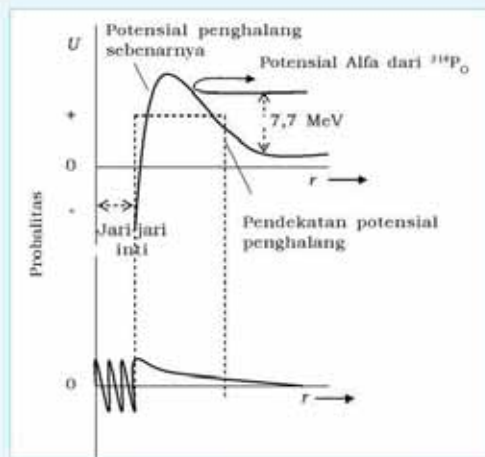
Ketika partikel alfa dipancarkan dari inti atom radioaktif, inti atom tersebut kehilangan dua proton dan dua neutron. Pada peristiwa ini nomor massanya atom tersebut (A) dikurangi 4 ($\Delta A = -4$) dan nomor atomnya, bilangan proton (Z) diturunkan 2 ($\Delta Z = -2$). Karena inti induk kehilangan 2 proton maka inti anak merupakan sebuah elemen yang mempunyai perbedaan 2 proton dan 4 massa. Jadi, dalam proses peluruhan terjadi perubahan satu inti ke inti lain yang lebih ringan.

Contoh sebuah isotop yang mengalami peluruhan alfa adalah polonium-214 dan uranium-238. Proses peluruhan disajikan dalam bentuk persamaan inti yang hampir sama dengan persamaan reaksi kimia, yang mana pada inti mengacu pada perubahan struktur intinya,



Perhatikan bahwa nomor massa total dan nomor atom total kedua sisi dari persamaan inti polonium dan uranium adalah sama, yaitu ($214 = 210 + 4$) dan ($84 = 82 + 2$). Untuk uranium-238, massa totalnya ($238 = 234 + 4$) dan bilangan proton ($92 = 90 + 2$). Dari kedua contoh persamaan inti nampak berlakunya hukum kekekalan massa dan muatan.

Di luar inti, gaya tolak-menolak elektrostatis semakin bertambah sebagaimana partikel alfa mengalami hamburan sebagai fungsi sudut (lihat bab 10). Di dalam inti terjadi gaya tarik-menarik yang sangat kuat, di mana gaya kuat inti sangat dominan. Kondisi seperti ini ditunjukkan pada gambar 11.3. Gambar 11.3 menunjukkan energi potensial listrik U sebagai fungsi r (jarak dari pusat inti). Di luar inti, U berbanding lurus terhadap $1/r$. Di dalam inti, U mempunyai tanda yang berlawanan dan mempunyai bentuk potensial negatif dikarenakan mempunyai gaya tarik yang sangat kuat. Hal ini dapat ditunjukkan pada hasil analisa ${}^{238}\text{U}$.

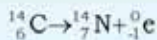


Gambar 11.3 Penerobosan Potensial Penghalang

Pada gambar 11.3 ditunjukkan bahwa partikel alfa dari elemen radioaktif polonium dengan energi 7,7 MeV tidak mampu menerobos potensial penghalang (barrier) ^{238}U sehingga partikel alfa terhambur. Sedangkan uranium sendiri meradiasi partikel alfa dengan energi 4,4 MeV sehingga tampak kontradiksi dengan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Rutherford. Artinya, bahwa peluruhan ^{238}U menghasilkan partikel alfa, yang berarti partikel tersebut mampu menerobos potensial penghalangnya. Namun ketika partikel alfa dari polonium yang berenergi lebih tinggi, ternyata tidak mampu menerobos potensial penghalang dari uranium. Sehingga timbul suatu pertanyaan, mengapa terjadi sesuatu yang kontradiktif dengan teori klasik? Bagaimana bisa partikel alfa dengan energi rendah mampu melewati potensial penghalang sedang partikel alfa dari polonium yang mempunyai energi lebih besar tidak bisa melewati potensial penghalang. Secara klasik ini melanggar kekekalan energi dan di dalam potensial penghalang ada daerah terlarang. Namun secara kuantum, sifat kontradiktif yang ditimbulkan oleh fisika klasik bisa diterangkan dengan pendekatan probabilitas untuk menemukan partikel dengan menggunakan konsep gelombang, lihat gambar 11.5 (ingat gelombang yang menjalar pada tali dari diameter kecil ke diameter yang lebih besar, sebagian gelombang dipantulkan dan sebagian diteruskan).

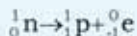
2. Peluruhan Beta (β)

Emisi sebuah elektron (sebuah partikel beta) dalam proses peluruhan dari elemen radioaktif tampaknya sangat kotradiktif jika kita berfikir tentang model inti atom yang terdiri dari proton dan neutron. Tentunya kalian juga harus berfikir bahwa emisi elektron yang dipancarkan dari peluruhan beta bukan berasal dari orbit elektron, tetapi diemisikan dari inti atom, walaupun di dalam inti tidak ada elektron. Kenyataannya, proses peluruhan beta menunjukkan bahwa elektron tersebut diciptakan dalam inti itu sendiri. Contoh: elemen radioaktif yang meluruh menghasilkan partikel beta.



karbon \rightarrow nitrogen + partikel beta (elektron)

Inti induk karbon mempunyai enam proton dan delapan neutron, menghasilkan inti anak nitrogen yang mempunyai 7 proton dan 7 neutron. Perhatikan, notasi khusus untuk elektron dengan nomor massa 0 dan bilangan muatan -1. Pada reaksi ini berlaku hukum kekekalan muatan dan inti. Neutron dari inti induk berkurang satu ($\Delta N = -1$) dan proton inti anak naik satu ($\Delta N = +1$). Sedang nomor massa tidak berubah. Ini menunjukkan bahwa sebuah neutron dalam inti meluruh ke dalam proton dan elektron,



neutron \rightarrow proton + elektron (dasar dari peluruhan beta)

Persamaan inti pada peluruhan beta menunjukkan sebuah gambaran adanya neutron bebas, yang tidak stabil ketika di luar inti. Notasi untuk neutron mempunyai nomor massa satu dan jumlah proton nol.

Ada dua jenis peluruhan beta, yaitu beta negatif (β^-) dan beta positif (β^+). Peluruhan (β^-) mencakup sebuah elektron, seperti persamaan inti di atas. Isotop yang meluruh dengan cara seperti ini, karena mereka mempunyai banyak neutron dibanding dengan proton untuk menjadikan inti stabil.

Isotop yang tidak stabil menjalani peluruhan β^+ atau peluruhan positron yang termasuk emisi positron ${}^0_{+1}\text{e}$, mereka mempunyai banyak proton dibandingkan neutron. Akibat peluruhan β^+ , terjadi perubahan proton ke neutron,



oksigen \rightarrow nitrogen + positron

Emisi positron juga diikuti oleh partikel lain yang disebut neutrino (berbeda tipe dengan peluruhan β^-). Pada peluruhan β^+ , nomor massa inti induk dan inti anak tidak mengalami perubahan, tetapi nomor proton dari inti anak kurang satu dari inti induk. Dengan demikian kita bisa menafsirkan bahwa proton mengalami disintegrasi menjadi neutron dan positron,



proton \rightarrow neutron + positron (dasar dari peluruhan β^+).

3. Peluruhan Gamma (γ)

Dalam peluruhan gamma, inti memancarkan sinar gamma atau sebuah partikel dari energi elektromagnetik. Pengemisia sinar gamma mirip dengan emisi foton pada proses de-eksitasi. Artinya, pada emisi sinar gamma terjadi akibat kedudukan inti yang tereksitasi dan kemudian melakukan deeksitasi. Ini bisa terjadi karena faktor tumbukan dengan partikel lain atau karena adanya posisi yang kosong akibat ditinggalkan partikel inti yang meluruh sebelumnya.

Dalam inti mempunyai tingkatan energi seperti tingkat-tingkat elektron pada atom. Tingkat energi inti mempunyai orde ke V sampai MeV lebih besar daripada tingkatan energi atom yang berorde eV. Akibatnya, sinar gamma lebih energik dan mempunyai frekuensi lebih besar daripada sinar-X dan panjang gelombangnya sangat pendek.

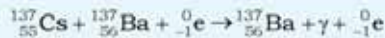
Contoh



nikel eksitasi \rightarrow nikel + sinar gamma

Tanda bintang pada nikel menunjukkan bahwa nikel pada keadaan tereksitasi. Proses de-eksitasi menghasilkan sinar gamma di mana jumlah massa dan proton tidak mengalami perubahan. Inti anak dalam keadaan ini energinya lebih kecil daripada inti induk.

Contoh lain isotop tidak stabil cesium-137 (${}^{137}_{55}\text{Cs}$) yang meluruh menjadi barium tereksitasi ${}^{137}_{56}\text{Ba}^*$ dan elektron (${}^0_{-1}\text{e}$), bentuk persamaan intinya dapat dituliskan,



Barium tereksitasi \rightarrow barium + sinar gamma (0,662 MeV).
Jadi, dalam proses de-eksitasi, barium tereksitasi menjadi barium sambil mengeluarkan sinar gamma dengan energi sebesar 0,662 MeV.

4. Waktu Paruh

Isotop radioaktif yang meluruh tidak meluruh semua dalam sekali peluruhan, namun secara acak dan tidak bisa dihitung dari luar. Peluruhan dari isotop yang tidak stabil lebih bersifat alamiah dan merupakan fungsi waktu. Oleh karena itu, kita bisa menentukan berapa banyak inti yang meluruh dalam satuan waktu tertentu.

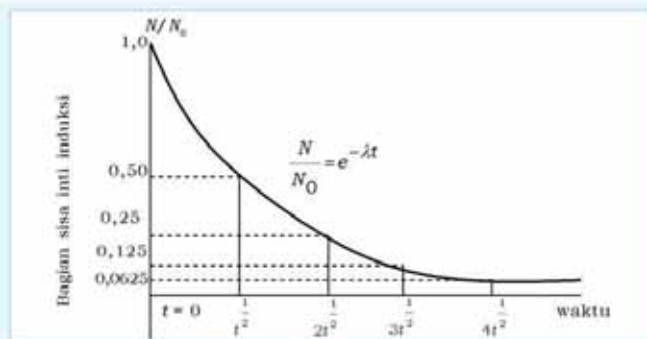
Aktivitas sampel dari isotop radioaktif didefinisikan sebagai jumlah inti yang meluruh per sekon. Jika diberikan sampel radioaktif dengan jumlah tertentu maka selama melakukan aktivitas akan terjadi pengurangan massa sampel sedikit demi sedikit sesuai dengan fungsi waktu, namun tetap ada sisanya. Setiap isotop mempunyai ciri tersendiri dalam penurunannya sesuai dengan partikel yang dipancarkan. Kelajuan penurunan jumlah inti induk N berbanding lurus dengan jumlah material sampel yang tersisa,

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} \propto N \quad (11.3)$$

yang dapat ditulis menjadi,

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N \quad (11.4)$$

Di mana λ adalah konstanta pembanding yang disebut konstanta peluruhan. Dari persamaan 11.4 dapat dikatakan bahwa semakin besar nilai, semakin besar kelajuan peluruhan dan isotop semakin bersifat radioaktif. Tanda negatif mempunyai makna bahwa nilai N selalu berkurang. Besarnya aktivitas sampel didefinisikan sebagai nilai positif dari $\Delta N/\Delta t$,



Gambar 11.4 Peluruhan radioaktif

Dengan menyelesaikan persamaan (11.4), kita peroleh N untuk inti yang tidak meluruh pada waktu t yaitu,

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \quad (11.5)$$

di mana N_0 adalah jumlah inti induk untuk $t = 0$.

Gambar 11.4 menunjukkan grafik $\frac{N}{N_0}$ fungsi waktu t dari persamaan 11.5. Satuan t dinyatakan dalam $t_{1/2}$.

Kelajuan meluruh sebuah isotop biasanya dinyatakan dalam waktu paruh daripada konstanta peluruhan. Waktu paruh $t_{1/2}$ didefinisikan sebagai waktu yang diperlukan untuk meluruh $\frac{1}{2}$ dari inti sampel radioaktif. Artinya, dalam waktu $t = t_{1/2}$, sisa

$N = \frac{1}{2} N_0$. Dari persamaan 11.5 diperoleh:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad (11.6)$$

Contoh: misalnya waktu paruh strontium-90 (^{90}Sr) adalah 28 tahun. Mula-mula kita memiliki $100\mu\text{g}$ ^{90}Sr , maka setelah 28 tahun massa strontium tinggal $50\mu\text{g}$ dan $50\mu\text{g}$ yang meluruh berubah menjadi ytrium dan memancarkan β dengan persamaan:



jadi, setelah 28 tahun $100\mu\text{g}$ (^{90}Sr) berubah menjadi $50\mu\text{g}$ (^{90}Sr) dan $50\mu\text{g}$ (^{90}Y)

Setelah 28 tahun, separuh dari inti strontium akan meluruh lagi menjadi $25 \mu\text{g}$ dan seterusnya. Semakin lama waktu paruh dari sebuah isotop, semakin lambat peluruhannya dan semakin kecil konstanta peluruhan.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikanlah contoh soal di bawah!

Contoh Soal 11.2

Waktu paruh dari iodine (yodium)-131 yang digunakan untuk mengobati seorang pasien yang menderita kelenjar gondok adalah 8 hari. Dalam waktu tertentu, jumlah dari ^{131}I sekitar $4,0 \times 10^{14}$. Inti diketahui berada pada kelenjar gondok si pasien. Berapa aktivitas yang akan diamati dan berapa banyak inti ^{131}I yang masih tersisa setelah dua hari?

Penyelesaian:

Diketahui:

$$t_{1/2} = 8,0 \text{ hari} = 6,9 \times 10^5 \text{ s}$$

$$N_0 = 4,0 \times 10^{14} \text{ inti}$$

$$t = 48 \text{ jam} = 17,2 \times 10^4 \text{ s}$$

Ditanya:

- Aktivitas peluruhan ($\Delta N / \Delta t$)?
- Inti yang belum meluruh (N)?

Jawab:

- Untuk menentukan aktivitas, perlu dihitung lebih dulu konstanta peluruhan dengan menggunakan persamaan:

$$\lambda = \frac{0,693}{t_{1/2}} = \frac{0,693}{6,9 \times 10^5 \text{ s}} = 1,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$$

- Kemudian menghitung aktivitas dengan menggunakan persamaan:

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = \lambda N_0 = (1,0 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1})(4,0 \times 10^{14} \text{ inti})$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = 4,0 \times 10^8 \text{ peluruhan/s}$$

Jumlah inti yang sebenarnya dapat ditentukan dari persamaan 10.5 dengan $t = 2$ hari dan $t_{1/2} = 0,693/8 \text{ hari} = 0,087/\text{hari}$

$$N = N_0 e^{-\lambda t} = (4,0 \times 10^{14} \text{ inti}) e^{-0,087 \text{ hari} \cdot 2 \text{ hari}}$$

$$N = (4,0 \times 10^{14} \text{ inti}) e^{-0,174} = 3,36 \times 10^{14} \text{ inti}$$

Satuan yang biasa digunakan untuk radioaktivitas adalah curie (Ci), nama ini diambil untuk menghormati jasa Pierre dan Marie Curie.

$$1 \text{ Ci} = 3,70 \times 10^{10} \text{ peluruhan/s.}$$

Satuan ini didasarkan pada aktivitas satu gram radium. Satuan SI untuk radioaktivitas adalah Becquerel (Bq), yang didefinisikan:

$$1 \text{ Bq} = 1 \text{ peluruhan/s}$$

Oleh karena itu,

$$1 \text{ Ci} = 3,70 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

C. Energi Ikat Inti

Aspek yang penting dari stabilitas inti adalah energi ikat inti. Ini dapat dihitung dengan memperhatikan jumlah massa inti dan elektron yang dikaitkan dengan energi.

Karena massa inti relatif kecil dibandingkan dengan standar satuan massa seperti kilogram maka diperlukan satuan lain yaitu satuan massa atom (atomik mass unit = u) digunakan untuk massa inti. Atom netral C-12 didefinisikan sebagai material yang mempunyai massa 12,000000 u. Jadi

$$1 \text{ u} = 1,6606 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

Tabel 11.1 menunjukkan berbagai jenis partikel dengan massa dan energinya ($E = m_0 c^2$).

Tabel 11.1 Massa dan Energi Partikel

Partikel	Massa (u)	Massa (kg)	Energi (MeV)
	1	$1,6606 \times 10^{-27}$	931,5
Elektron	0,000548	$9,1095 \times 10^{-31}$	0,511
Proton	1,00727	$1,67265 \times 10^{-27}$	938,28
^1_1H	1,007825	$1,67356 \times 10^{-27}$	938,79
Neutron	1,008665	$1,67500 \times 10^{-27}$	938,57

Jadi, sebuah material yang mempunyai massa 1u mempunyai energi,

$$\begin{aligned}
 m_0 c^2 &= (1,6606 \times 10^{-27} \text{ kg})(2,9977 \times 10^8 \text{ m/s})^2 = 1,4922 \times 10^{-10} \text{ J} \\
 &= \frac{1,4922 \times 10^{-10} \text{ J}}{1,602 \times 10^{-13} \text{ J/MeV}} = 931,5 \text{ MeV (lihat tabel 11.1)}
 \end{aligned}$$

Kita akan menggunakan 931,5 MeV/u sebagai konversi energi untuk memudahkan perhitungan dan menghindari perkalian c^2 . Dalam tabel 11.1 tampak masing-masing partikel dipisahkan seperti ^1_1H , proton dan elektron dengan maksud agar kalian mengetahui adanya perbedaan massa antara ketiga partikel. Seperti yang telah dibicarakan sebelumnya bahwa atom hidrogen netral terdiri dari satu proton dan satu elektron dengan nomor massa 1. Membawa konsekuensi bahwa massa atom hidrogen harus sama dengan jumlah massa satu proton dan satu elektron. Sebaliknya, jika massa satu proton dan satu elektron digabung ($1,007818\text{u}$) tidak sama dengan massa atom hidrogen ($1,007825\text{u}$). Adanya perbedaan massa ini yang perlu kita perhatikan apa yang sebenarnya terjadi pada sistem tersebut.

Contoh nyata bisa kalian lihat hubungan massa-energi pada inti yang stabil. Jika kalian bandingkan antara massa inti helium terhadap massa inti pembentuknya, tidak akan sama. Massa atom helium netral $4,002603\text{u}$. Total massa dua proton dan dua elektron atau dua atom ^1_1H dan dua neutron,

$$2m(^1_1\text{H}) + 2m_n = 2,015650\text{u} + 2,017330\text{u} = 4,032980\text{u}$$

Total massa ini lebih besar daripada massa atom helium. Inti helium kurang padat daripada massa masing-masing partikel penyusunnya sebesar,

$$\begin{aligned}
 \Delta m &= [2m(^1_1\text{H}) + 2m_n] - m(^4_2\text{He}) \\
 \Delta m &= 0,030377\text{u}
 \end{aligned}$$

Perbedaan massa ini disebut sebagai defek massa yang mempunyai energi sebesar $(0,030377u)(931,5 \text{ MeV}/u) = 28,30 \text{ MeV}$ yang mana energi sebesar 28,30 MeV disebut sebagai energi ikat (E_b). Energi ikat adalah energi yang dibebaskan ketika masing-masing inti penyusunan membentuk inti atom. Secara umum energi ikat diberikan dalam bentuk persamaan,

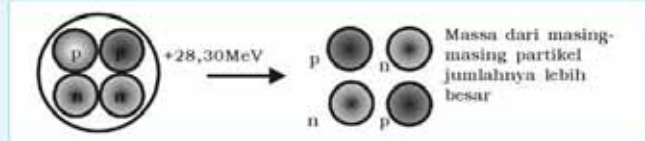
$$E_b = (\Delta m)c^2 \quad (11.7)$$

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, kerjakanlah tugas berikut!

Tugas 11.1

Hitung berapa besar energi ikat untuk penggabungan ^1H yang terdiri dari satu proton dan satu elektron!

Cara lain untuk menentukan energi ikat yaitu energi yang diperlukan untuk memisahkan partikel-partikel dari partikel gabungan menjadi partikel bebas, lihat gambar 11.5!



Gambar 11.5 Energi ikat

Gambar 11.5 adalah sebuah inti helium. Untuk memisahkan inti helium dari inti-inti penyusunnya memerlukan energi sebesar 28,30 MeV.

Energi sebesar 28,30 MeV adalah energi yang diperlukan untuk memisahkan ke empat partikel dari atom helium. Energi ikat rata-rata per masing-masing inti adalah $28,30 \text{ MeV}/4 = 7,075 \text{ MeV}$. Angka 4 menunjukkan dua proton dan dua neutron. Secara umum energi rata-rata dituliskan,

$$E_b = \frac{E_b}{A} \quad (11.8)$$

Di mana A adalah jumlah proton ditambah jumlah neutron.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, kerjakanlah tugas berikut!

Tugas 11.2

Atom lithium ${}^7_3\text{Li}$ mempunyai massa 7,0160 u. Inti atom lithium tersusun dari 3 proton dan 4 neutron. Dengan melihat tabel 11.1, hitung energi ikat rata-ratanya!

D. Reaksi Inti

Dalam reaksi inti terjadi perubahan komposisi inti atom selama proses perubahan bentuk inti yang satu ke inti yang lain sehingga membentuk elemen baru.

Untuk melakukan reaksi inti, para ahli telah menggunakan cara dengan menembakkan inti dari sumber lain dengan energi yang tinggi. Rutherford telah melakukan penembakkan nitrogen dengan partikel alfa yang diradiasikan oleh bismuth-214.



Jadi, penembakkan partikel alfa terhadap nitrogen akan terbentuk fluorida eksitasi sebelum menghasilkan oksigen dan proton. Implikasi dari percobaan Rutherford yang pada prinsipnya dapat mengubah dari satu elemen ke elemen yang lain menjadikan para ahli kimia memimpikan untuk mengubah elemen lain menjadi elemen logam mulia, misalnya emas. Namun impian ini dihadapkan kebutuhan peralatan pemercepat partikel penembak (*accelerator*) yang dapat menghasilkan energi sangat tinggi.



Jadi, secara teoritis jika proton ditembakkan ke logam merkuri akan menghasilkan logam emas dan partikel alfa. Tentunya dengan perkembangan fisika modern menjadi impian yang perlu diwujudkan. Namun biaya operasional, khususnya untuk membuat alat akselerator sangat mahal dibandingkan dengan harga emas itu sendiri.

Secara umum, bentuk persamaan untuk reaksi inti diberikan,



di mana huruf besar menunjukkan elemen inti dan huruf kecil menunjukkan jenis partikel. Dituliskan dengan suatu notasi,

$$A(a,b)B \quad (11.12)$$

Jadi, pada persamaan 11.9 dan 11.10 dapat ditulis dengan notasi,

$$^{14}\text{N}(\alpha, p)^{17}\text{O} \text{ dan } ^{200}\text{Hg}(p, \alpha)^{197}\text{Au}$$

Pada reaksi inti berlaku hukum kekekalan energi. Reaksi dari persamaan (11.19) adalah:

$$(E_{kN} + m_N c^2) + (E_{ka} + m_a c^2) = (E_{kO} + m_O c^2) + (E_{kp} + m_p c^2) \quad (11.13)$$

Jika disusun kembali, persamaan (11.13) menjadi,

$$E_{kO} + E_{kp} - E_{kN} - E_{ka} = (m_N + m_a - m_O - m_p) c^2 \quad (11.14)$$

Persamaan 11.14 dapat dituliskan sebagai perbedaan energi kinetik dengan nilai Q ,

$$Q = \Delta E_k = (E_{kO} + E_{kp}) - (E_{kN} + E_{ka})$$

atau

$$Q = (m_N + m_a - m_O - m_p) c^2 \quad (11.15)$$

Dengan cara yang sama persamaan 11.15 dapat dituliskan,

$$Q = (m_N + m_a) - (m_O + m_p) c^2 = \Delta m c^2 \quad (11.16)$$

Berdasarkan data massa yang ada pada persamaan (11.19), dapat ditentukan nilai Q ,

$$Q = (m_N + m_a) - (m_O + m_p) c^2 = \Delta m c^2$$

$$Q = (14,003074 \text{ u}) + 4,002603 \text{ u} - (16,9991333 \text{ u} + 1,007825 \text{ u}) c^2$$

$$Q = -1,193 \text{ MeV}$$

Tanda negatif untuk nilai Q menunjukkan bahwa ada penyerapan energi selama reaksi. Jika Q lebih kecil dari nol ($Q < 0$) dinamakan reaksi endotermik dan sebaliknya $Q > 0$ disebut reaksi eksotermik.

Untuk meningkatkan **kemampuan akademik dan personal** kalian, perhatikan contoh soal di bawah!

Contoh Soal 11.3

Tentukan jenis reaksi inti yang terjadi pada,
 $^2_1\text{H} + ^2_1\text{H} \rightarrow ^3_2\text{He} + ^1_0\text{n}$ Untuk massa deuteron (2,014102 u),
 massa helium (3,016029 u) dan massa neutron (1,008665 u).

Penyelesaian:**Diketahui:**

$$m_D = 2,014102 \text{ u}$$

$$m_{He} = 3,016029 \text{ u}$$

$$m_n = 1,008665 \text{ u}$$

Ditanya:

Energi kinetik (Q)

Jawab:

Untuk menjawab pertanyaan ini kalian dapat menggunakan persamaan 11.20,

$$\Delta m = 2m_D - m_{He} - m_n$$

$$\Delta m = 0,00351 \text{ u}$$

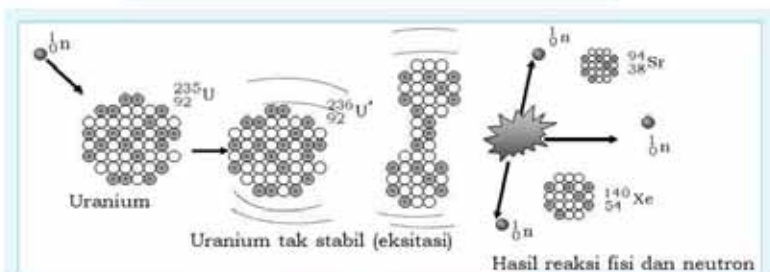
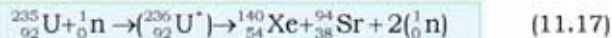
$$Q = (0,00351 \text{ u})c^2$$

$$Q = (0,00351 \text{ u})(931,5 \text{ MeV/u}) = +3,27 \text{ MeV}$$

Hasil perhitungan menunjukkan reaksi bersifat eksoterm yang berarti selama proses reaksi inti mengeluarkan energi sebesar 3,27 MeV.

1. Reaksi Fisi

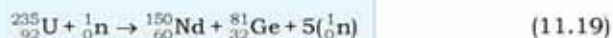
Reaksi fisi adalah jenis reaksi pemecahan inti induk menjadi beberapa bagian atau beberapa inti anak. Uranium merupakan jenis elemen berat jika ditembaki dengan partikel khususnya neutron, maka akan menghasilkan pemisahan inti uranium menjadi dua bagian,



Gambar 11.6 Proses fisi uranium -235

Jadi dari persamaan 11.17 kalian bisa melihat bahwa elemen uranium-235 terbagi menjadi dua elemen xenon-140 dan strontium-94. Reaksi seperti ini disebut sebagai reaksi fisi (pemecahan), lihat gambar 11.6.

Contoh pada reaksi pada persamaan 11.17 adalah salah satu hasil penembakan partikel neutron ke uranium, contoh lain bisa kalian perhatikan yaitu:



Perbedaan yang tampak pada persamaan 11.18 dan persamaan 11.19 adalah hasil penembakan neutron terhadap uranium-235. Perbedaan ini tergantung pada energi neutron yang digunakan untuk menembaki uranium-235.

2. Reaksi Fusi

Jenis reaksi inti yang lain adalah reaksi fusi, yaitu reaksi penggabungan dari elemen ringan menjadi elemen yang lebih berat dengan membebaskan energi ($Q > 0$). Contoh: reaksi dari dua inti deuterium yang biasa disebut reaksi D-D dengan membebaskan energi sebesar 3,27 MeV.

Contoh lain dalam reaksi fusi adalah reaksi antara deuterium dengan tritium (D-T),



Kalian bisa menghitung nilai Q dengan memasukkan data massa dari masing-masing elemen, yaitu massa deuterium = 2,014102 u, massa tritium = 3,016049 u, massa helium = 4,002603 u dan massa neutron 1,008665 u. Dari hasil reaksi fusi membebaskan energi $Q = 17,6$ MeV.

Perhatikan bahwa hasil reaksi fusi lebih kecil jika dibandingkan energi yang dibebaskan dari reaksi fisi yang mencapai orde 200 MeV. Dalam hal ini kalian bisa membandingkan massa hidrogen dengan massa uranium. Namun dengan memberikan massa isotop hidrogen yang banyak, memberikan inti hidrogen yang banyak dibandingkan isotop dari elemen berat yang dapat melakukan reaksi fisi. Reaksi fusi hidrogen dapat memberikan energi tiga kali lebih besar dari reaksi fisi uranium. Kira-kira 0,4% massa hidrogen diubah menjadi bentuk energi, sedang uranium hanya sekitar 0,1%.

Dalam kehidupan kita hampir sebagian besar merasakan adanya ketergantungan dari reaksi fusi. Sumber reaksi fusi adalah energi yang dibebaskan dari bintang kita, yaitu Matahari. Pada prinsipnya energi yang dibebaskan oleh Matahari adalah pembakaran hidrogen atau reaksi fusi dari hidrogen ke helium. Reaksi berantai yang ditunjukkan oleh reaksi pada Matahari adalah,



Kemudian proton dan deuterium mengadakan reaksi fusi,

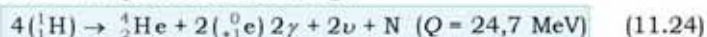


Reaksi fusi berlanjut antara tritium yang terbentuk,



Hasil akhir dari reaksi fusi yang terjadi adalah helium dan proton dan disebut sebagai siklus proton-proton, dikarenakan kembali akan terjadi reaksi fusi seperti persamaan 11.21.

Secara umum dapat dikatakan bahwa reaksi fusi yang terjadi di Matahari adalah kombinasi 4 proton untuk membentuk satu helium ditambah dua partikel positron, dua sinar gamma dan dua neutrino dan pembebasan energi,



E. Radiasi Bagi Kesehatan

Dalam dunia kesehatan, secara biologi mempunyai dua aspek, yaitu aspek yang menguntungkan dan aspek yang merugikan. Radiasi ini bisa digunakan untuk mendiagnosa kesehatan atau *men-treatmen* jenis penyakit tertentu, misalnya untuk membunuh sel kanker, tetapi mempunyai potensi yang membahayakan jika penggunaannya tidak sesuai dosis yang ditentukan. Radiasi inti atom dari isotop tidak stabil dan sinar-X mampu menembus jaringan tubuh manusia tanpa merasa sakit. Penelitian menunjukkan penggunaan dosis yang terlalu besar atau penggunaan dosis kecil yang berulang-ulang akan menimbulkan efek pada kulit menjadi kemerahan. Dosis yang dapat menyakitkan atau merusak jaringan tubuh dikarenakan terjadinya proses ionisasi sel yang dijadikan target radiasi. Partikel alfa, beta, gamma, sinar-X dan neutron merupakan jenis radiasi yang bersifat ionisasi.

Ion hasil radiasi mungkin bersifat reaktif seperti ion hidroksil (OH^\cdot) dari air yang mampu bergabung dengan molekul lain. Jika ion ini mempunyai cukup energi, sel bisa rusak atau mati. Sel yang baru belum tentu secepat yang diharapkan untuk mengganti sel yang mati atau rusak akibat radiasi. Jika sel yang rusak adalah kromosom yang ada dalam inti sel tentunya akan berakibat pada keturunan.

Radiasi dapat menyebabkan terjadinya kanker, tapi bisa juga digunakan untuk membunuh sel kanker. Dosis radiasi yang terlokalisasi digunakan untuk membunuh sel kanker. Radiasi yang digunakan mungkin sinar gamma yang dihasilkan dari peluruhan cobalt-60 atau sinar-X dari mesin akselerator (Linac = *linear Accelerator*). Yang menghasilkan energi dalam orde 1-4 MeV. Penggunaan radiasi beta hanya mampu menerobos ke jaringan sel tubuh beberapa millimeter.

1. Filter Yang Digunakan untuk Terapi dengan Sinar X Konvensional

Sinar-X dapat digunakan untuk pencitraan medis dan terapi medis. Untuk terapi medis diperlukan sinar-X yang berenergi tinggi (dalam MeV). Padahal spektrum sinar-X mempunyai rentang energi yang lebar. Maka untuk menggunakannya sinar-X harus difilter lebih dahulu untuk menghilangkan spektrum yang energinya tidak diinginkan. Filter yang sering digunakan adalah tembaga, aluminium, dan nikel. Makin tinggi energi sinar-X, makin tebal filter yang digunakan.

Untuk pencitraan medis (diagnosa) hanya diperlukan energi yang rendah daripada untuk terapi, misalnya sekitar 20 keV untuk mamografi (mendeteksi kanker/tumor payudara), (50-100)keV untuk dada dan perut.

2. Intensitas Sinar - X

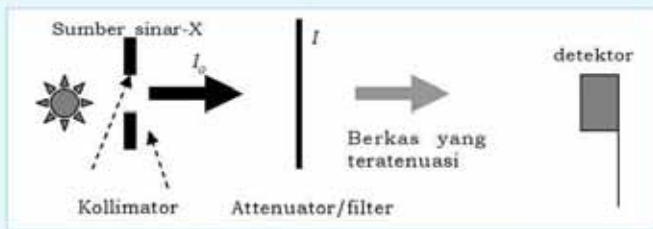
Dalam radiasi terapi tumor/kanker kita perlu mengetahui intensitas atau kekuatan sinar-X yang dihasilkan dari mesin sinar-X. Informasi besarnya intensitas ini sangat diperlukan sehingga dalam melakukan terapi kita tidak melakukan suatu kesalahan yang fatal misalkan dosisnya terlalu rendah atau terlalu tinggi sehingga merugikan pasien. Intensitas didefinisikan sebagai jumlah energi per satuan luas dan per satuan waktu yang tegak lurus terhadap arah berkas dilokasi yang menjadi perhatian. Intensitas di tumor atau film berkurang dikarenakan faktor divergen dan attenuasi.

3. Attenuasi

Berkas sinar-X yang dijatuhkan pada target akan mengalami beberapa proses, yaitu efek fotolistrik dan hamburan Compton. Pada kedua proses tersebut intensitas sinar-X yang keluar dari target lebih kecil dari intensitas yang masuk. Berkurangnya intensitas sinar-X yang mengenai target disebut pelemahan atau attenuasi. Hubungan antara intensitas yang datang dan intensitas yang ditransmisikan I adalah

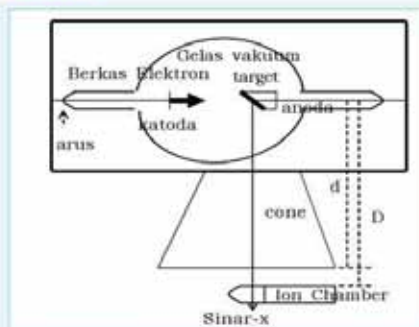
$$I = I_0 e^{-\mu x} \text{ atau } T = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu x} \quad (11.25)$$

di mana μ = koefisien attenuasi linier, x = tebal target yang dilewati, T = transmisi.



Gambar 11.7 Pengukuran attenuasi

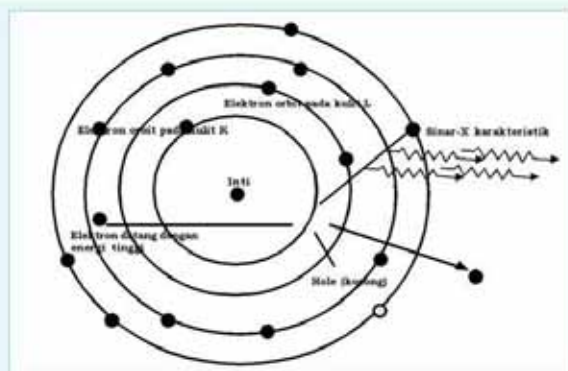
4. Intensitas Radiasi



Gambar 11.8 Kalibrasi mesin sinar x dan kalibrasinya

Sinar-X dapat dihasilkan oleh mesin sinar-X konvensional seperti yang ditunjukkan pada gambar 11.8. Ada dua jenis sinar-X yang dihasilkan, yaitu sinar-X karakteristik dan sinar-X Bremsstrahlung.

Sinar-X karakteristik dihasilkan bila elektron cepat menumbuk elektron pada atom target pada kulit yang lebih dalam, sehingga elektron terpantul, lihat gambar 11.9. Hal ini menyebabkan pada kulit dalam terjadi hole. kemudian, hole akan diisi elektron dari kulit luar, karena energi elektron pada kulit luar lebih besar daripada energi elektron pada kulit dalam. Perbedaan energi ini dipancarkan dalam bentuk sinar-X.



Gambar 11.9 Mekanisme terjadinya sinar X karakteristik

Sinar-X Bremsstrahlung (kontinu) terjadi bila elektron cepat masuk ke target pada lintasan dekat inti sehingga elektron mengalami perlambatan yang disebabkan adanya gaya tarik inti. Perlambatan ini menghasilkan sinar-X kontinyu, yaitu sinar-X monokromatik.

Untuk tujuan terapi digunakan sinar-X kontinyu, karena dapat dihasilkan untuk setiap tingkat energi, dari energi rendah hingga energi tinggi. Dari uraian di atas dapat disimpulkan bahwa sinar-X dengan rentang energi lebar harus difilter.

Pentingnya standarisasi pengukuran radiasi

Setelah ditemukannya sinar-X untuk terapi, satuan standar pengukuran radiasi diperlukan untuk menggambarkan jumlah radiasi yang dikirimkan ke pasien. Satuan standar dalam radiasi onkologi digunakan untuk memprediksi efek biologi dan hasil terapi.

Pertama satuan yang digunakan adalah *skin erythema dose*, jumlah radiasi yang diperlukan untuk "*barely perceptibly*" yang menyebabkan kulit berwarna kemerahan. Jelas satuan ini sangat bervariasi. Dalam kenyataan, *erythema skin dose* yang telah diteliti oleh Antoine Becclere, dalam tahun 1920-an memberikan batasan antara 285 sampai 1120 rontgen.

5. Dosis Radiasi Yang Terserap

Desain untuk mesin sinar-X konvensional harus konsisten dan terkalibrasi sehingga dapat digunakan di seluruh dunia. Untuk memudahkan penggunaan satuan yang menyangkut pada efek biologi diperlukan adanya satuan lain yaitu rad (*radiation absorbed dose*). Asal usul dari satuan ini adalah erg yaitu energi yang diserap oleh materi per satuan gram, di mana $1 \text{ rad} = 100 \text{ erg}$. Rad diganti dalam satuan SI dengan gray.

Gray dan rad sebagai satuan untuk dosis yang diserap sehingga berbeda dengan R (satuan exposure). Satuan ini tidak terbatas pada penggunaan sinar-X dan gamma yang berkaitan dengan foton, namun juga muatan lain seperti elektron, proton, dan bahkan neutron. Rad dan gray juga digunakan untuk mengukur kerma. Berlawanan dengan pengertian R, rad dan gray menggambarkan energi yang diserap persatuan massa, bukan jumlah ionisasi yang dihasilkan dalam chamber.

Ada dua keuntungan dalam penggunaan dosis yang diserap dari pada exposure.

- a. Dapat diaplikasikan ke semua radiasi ion, tidak hanya sinar-X dan sinar gamma.
 - b. Berkaitan langsung terhadap pengaruh radiasi karena energi ini terdepositasi, tidak semata-mata ionisasi dari molekul udara.
- Definisi gray adalah:

$$\begin{aligned} 1 \text{ gray} &= \frac{\text{energi yang diserap dalam 1 joule}}{1 \text{ kg materi}} \\ 1 \text{ Gy} &= \frac{1 \text{ J}}{\text{kg}} \end{aligned} \quad (1.12)$$

Jadi dari definisi gray memberikan dua pengertian yaitu jumlah energi yang diserap dan massa yang menyerap energi tersebut. Kenyataannya, exposure dari soft tissue untuk 1R sinar-X menghasilkan dosis yang diserap sebesar kira-kira 1cGy (1rad). Hubungan rad terhadap R dapat diturunkan sebagai berikut:

Dosis energi yang diserap oleh udara (D_{udara}) dapat dihitung:

$$\begin{aligned} D_{\text{udara}} &= 1,61 \times 10^{12} \text{ pasangan ion/gram (definisi roentgen)} \\ &\times 33,85 \text{ eV/pasangan ion (energi rata-rata/pasangan ion)} \\ &\times 1,602 \times 10^{-12} \text{ erg/eV (konversi dari eV ke erg)} \\ &= 87,3 \text{ erg/gram} \end{aligned}$$

karena 1 rad terdefinisi 100 erg/gram, jika dinyatakan dalam satuan Gy maka,

$$D_{\text{udara}} = 0,873 \text{ rad} = 0,873 \times 10^{-2} \text{ Gy} = 0,873 \text{ cGy.} \quad (1.13)$$

dengan cara yang serupa, dosis yang terserap per satuan massa untuk udara yang diekpose ke exposure $X(R)$ diberikan oleh,

$$D_{\text{udara}} = X(R) \times 0,873 \text{ cGy/R} \quad (1.14)$$

Dalam prakteknya, cGy sering digunakan dari pada gray atau milligray karena menyangkut besaran rad dimana 1 cGy=100 rad.

Penentuan dosis udara sangat berguna untuk menentukan dosis tissue. f_{medium} (baca f -faktor) berkaitan dengan dosis dalam udara dan dos dalam tissue.

Rangkuman

1. Jari-jari elektron dalam mengelilingi inti atom dinyatakan dengan $A \approx R^3 \rightarrow R = R_0 A^{1/3}$
2. Inti atom diberi simbol ${}_Z^AX_N$, dimana X adalah nama atom, A adalah nomor massa = jumlah proton (Z) ditambah jumlah neutron (N). Jadi $A = Z + N$
3. Inti atom dapat berubah menjadi inti atom yang lain dengan memancarkan zat radioaktif seperti α , β , dan γ
4. Laju partikel radioaktif yang meluruh dinyatakan dengan $\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$
5. Hubungan antara waktu paruh dengan koefisien peluruhan dinyatakan dengan $t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$
6. Secara umum, bentuk persamaan untuk reaksi inti diberikan: $A + a \rightarrow B + b$
7. Reaksi inti dibagi menjadi dua, yaitu reaksi fisi dan reaksi fusi.

Uji Kompetensi

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

- Energi ikat inti adalah
 - energi yang diperlukan untuk menyatukan proton-proton dan neutron-neutron dalam inti atom
 - energi yang diperlukan untuk memutuskan inti atom menjadi proton dan neutron
 - energi yang diperlukan untuk menyatukan proton-proton, neutron-neutron dan elektron - elektron dalam sebuah atom
 - energi yang dibebaskan ketika proton dan neutron bersatu dalam inti atom
 - energi yang dibebaskan ketika inti atom pecah menjadi proton-proton dan neutron-neutron
- Jumlah peruruhan per sekon dalam suatu contoh nuklida radioaktif bergantung pada:
 - Jumlah atom dalam satu mol atom nuklida.
 - Jumlah atom dalam contoh.
 - Waktu paruh nuklida.
 Pernyataan yang benar adalah
 - 1, 2, dan 3
 - 1 dan 2
 - 2 dan 3
 - 1
 - 3
- Massa inti karbon ${}^6_6\text{C}^{12} = 12.000$ sma, massa proton dan neutron masing - masing 1,0078 sma. Defek massa dalam pembentukan inti karbon adalah
 - 24,0984 sma
 - 12, 0984 sma
 - 6,0516 sma
 - 6,0468 sma
 - 0,0984 sma
- Bila isotop ${}^3_2\text{He}$ dan ${}^4_2\text{He}$ dipisahkan oleh spektrometer massa maka akan didapat lintasan busur lingkaran yang jari-jarinya R_1 dan R_2 . $\frac{R_1}{R_2}$ adalah
 - $\frac{5}{6}$
 - $\frac{3}{4}$
 - $\frac{2}{3}$
 - $\frac{1}{2}$
 - $\frac{2}{7}$

5. Dalam waktu 48 hari, $\frac{63}{64}$ bagian suatu unsur radioaktif meluruh. Waktu paruh unsur radioaktif tersebut (dalam hari) adalah
- 8
 - 16
 - 24
 - 32
 - 36
6. Apabila ${}^4_2\text{He} = 2,009 \text{ sma}$; ${}^3_1\text{H} = 3,016 \text{ sma}$; ${}^4_2\text{He} = 4,003 \text{ sma}$; ${}^1_1\text{p} = 1,009 \text{ sma}$ dan $1 \text{ sma} = 931 \text{ MeV}$ maka energi yang dibebaskan pada reaksi ${}^3_1\text{H} + {}^3_1\text{H} + {}^1_0\text{n}$ sebesar
- 12,103 MeV
 - 15,250 MeV
 - 15,780 MeV
 - 16,122 MeV
 - 16,671 MeV
7. Sumber energi matahari adalah reaksi inti 4 proton \rightarrow helium $+ 2e^+$.
Diketahui:
Massa proton = $1,6726 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Massa e^+ = $0,0009 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Massa helium = $6,6466 \times 10^{-27} \text{ kg}$
Jika dalam reaksi inti terbentuk 6,6466 gram helium maka energi yang dihasilkan adalah
- $3,8 \times 10^{12} \text{ joule}$
 - $6,8 \times 10^{13} \text{ joule}$
 - $5,1 \times 10^{14} \text{ joule}$
 - $6,6 \times 10^{15} \text{ joule}$
 - $3,6 \times 10^{16} \text{ joule}$
8. Suatu reaktor atom dengan bahan bakar U-235 tiap hari menghabiskan 21,15 gram uranium. Jika bilangan Avogadro $N_A = 6 \times 10^{26} \text{ mol}^{-1}$ (atau $6 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) maka daya reaktor atom tersebut jika tiap inti U-235 terbelah timbul energi 200 MeV serta efisiensinya 75 % adalah
- 25 MW
 - 20 MW
 - 15 MW
 - 10 MW
 - 5 MW
9. Suatu reaktor nuklir yang bahan bakarnya U-235 ternyata pada suatu saat menghabiskan uranium 4,7 gram. Jika tiap pembelahan inti uranium timbul energi 200 MeV dan $N_A = 6 \times 10^{26} \text{ mol}^{-1}$ Besarnya energi total yang dihasilkan adalah
- $1,2 \times 10^{24} \text{ MeV}$
 - $1,8 \times 10^{24} \text{ MeV}$
 - $2,4 \times 10^{24} \text{ MeV}$
 - $3,6 \times 10^{24} \text{ MeV}$
 - $4,2 \times 10^{24} \text{ MeV}$

10. Suatu fosil (tulang dari manusia purba) ternyata perbedaan kandungan C-14 dibandingkan dengan C-14 tulang orang yang baru saja meninggal adalah 96,875%. Jika waktu paruh C-14 adalah 8500 tahun maka umur fosil tersebut adalah
- 8.000 tahun
 - 15.000 tahun
 - 20.000 tahun
 - 24.000 tahun
 - 29.000 tahun

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

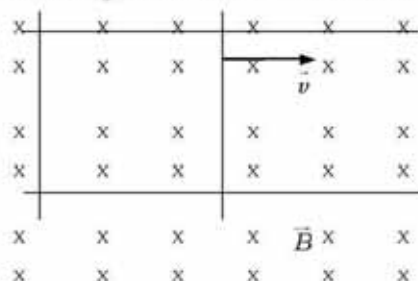
- Kobalt-60 sering digunakan sebagai sumber radiasi dalam ilmu kedokteran, waktu paruhnya 5,25 tahun. Hitung berapa lama sejak sampel Kobalt baru diterima dari pesanan, sehingga aktivitasnya akan berkurang menjadi 1/8 dari semula!
- Lengkapilah persamaan reaksi berikut ini.
 - ${}_{11}\text{Na}^{23} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_{12}\text{Mg}^{26} + \dots$
 - ${}_5\text{B}^{10} + {}_2\text{He}^4 \rightarrow {}_7\text{N}^{13} + \dots$
 - ${}_{13}\text{Al}^{27} + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_{12}\text{Mg}^{27} + \dots$
- Hitung besar energi yang dibebaskan ketika ${}^{14}\text{C}$ meluruh secara spontan menjadi ${}^{14}\text{N}$ dan memancarkan sinar β , jika diketahui massa ${}^{14}_6\text{C} = 14,0032 \text{ sma}$, massa ${}^{14}_7\text{N} = 14,0030 \text{ sma}$!
- Fosil binatang pada waktu ditemukan mengandung ${}^{14}\text{C}$ dengan aktivitas 13 disintegrasi per menit pergram karbon, aktivitas ${}^{14}\text{C}$ pada binatang yang masih hidup adalah 16 per menit per gram. Hitung usia fosil tersebut jika waktu paruh ${}^{14}\text{C}$ adalah 5760 tahun!
- ${}^{32}\text{P}$ mempunyai waktu paruh 14,3 hari. Hitung aktivitas 1 gram fosfor tersebut!

Setelah kalian mengerjakan soal-soal dalam uji kompetensi di atas, cocokkanlah jawaban kalian dengan teman-teman kalian. Bersainglah dengan mereka untuk menjadi yang terbaik!

Latihan Ulangan Semester II

A. Pilihlah satu jawaban yang paling benar dengan cara memberi tanda silang (X) pada huruf a, b, c, d, atau e! Kerjakan di buku tugas!

1. Perhatikan gambar kawat di bawah ini!



Kawat PQ sepanjang 50 cm digetarkan ke kanan dengan kecepatan tetap dalam suatu medan magnet homogen $\vec{B} = 0,05$ tesla. Bila hambatan $R = 10\Omega$ maka nilai dan arah arus listrik yang melalui hambatan R adalah . . .

- 0,05 A, ke atas
 - 0,05 A, ke bawah
 - 0,25 A, ke atas
 - 0,25 A, ke bawah
 - 2,50 A, ke atas
2. Suatu kawat membentuk persegi panjang PQRS dengan luas 10 cm^2 diletakkan pada magnet $B = 0,1$ tesla. Jika \vec{B} membentuk sudut 30° dengan bidang kawat maka fluks magnetik pada kawat adalah
- $10 \times 10^{-5} \text{ Wb}$
 - 5 Wb
 - $5 \times 10^{-5} \text{ Wb}$
 - $2,5 \times 10^{-5} \text{ Wb}$
 - $\frac{5}{16} E \text{ Wb}$
3. Sebuah trafo step-up mengubah tegangan 25 V menjadi 250 V. Jika efisiensi trafo itu 80% dan kumparan sekundernya dihubungkan dengan 250 V, 50 W, kuat arus dalam kumparan primernya adalah . . .
- 0,5 A
 - 1,0 A
 - 1,5 A
 - 2,5 A
 - 5,8 A

4. Suatu kumparan terdiri dari 200 lilitan berbentuk persegi panjang dengan panjang 10 cm dan lebar 5 cm. Kumparan ini mempunyai sumbu putar yang tegak lurus medan magnetik sebesar 0,5 T dan diputar dengan kecepatan sudut 60 rad/s. Pada ujung-ujung kumparan akan timbul ggl induksi maksimum sebesar
 - a. 30 V
 - b. 50 V
 - c. 60 V
 - d. 220 V
 - e. 240 V
5. Arus pada sebuah kumparan (500 mH) berubah setiap saat menurut fungsi $I(t) = 2t^2 + 5t - 3$. Besar GGL induksi diri pada saat $t = 0,1$ sekon adalah
 - a. 2200 V
 - b. 220 V
 - c. 22 V
 - d. 4,4 V
 - e. 2,2 V
6. Jika tetapan Wien = $2,9 \times 10^{-3}$ m.K maka panjang gelombang elektromagnetik yang membawa radiasi kalor terbanyak dari sebuah benda yang bersuhu 227°C adalah
 - a. $5,8 \times 10^{-6}$ m
 - b. $1,7 \times 10^{-6}$ m
 - c. $1,3 \times 10^{-6}$ m
 - d. $5,8 \times 10^{-7}$ m
 - e. $1,5 \times 10^{-7}$ m
7. Model atom Rutherford menyatakan bahwa
 - a. proton dan massa atom elektron terletak di tengah dan elektron berputar mengelilinginya
 - b. atom adalah bagian terkecil dari suatu unsur
 - c. elektron berputar mengelilingi inti atom dengan lintasan tetap
 - d. atom berbentuk bulat memiliki proton dan elektron yang tersebar di permukaan
 - e. elektron dapat berpindah lintasan dengan menyerap atau melepaskan energi
8. Transisi-transisi berikut terjadi pada elektron atom hidrogen. Yang memancarkan energi paling besar adalah dari lintasan ke
 - a. 5 ke 1
 - b. 5 ke 2
 - c. 1 ke 5
 - d. 2 ke 5
 - e. 1 ke 2

9. Jika konstanta Ridberg = R maka panjang gelombang batas pada deret Balmer dalam spektrum atom hidrogen masing-masing adalah
- $4/5 R$ dan $36/R$
 - $4/R$ dan $36/R$
 - $9/R$ dan $144/R$
 - $144/R$ dan $9/7R$
 - $16/R$ dan $400/9R$
10. Berikut ini yang merupakan kumpulan yang mungkin dari bilangan – bilangan kuantum untuk sebuah elektron dalam orbital $3d$ adalah
- $n=3, l=3, m_l=1, m_s=1/2$
 - $n=3, l=2, m_l=2, m_s=1/2$
 - $n=3, l=-2, m_l=0, m_s=1/2$
 - $n=3, l=2, m_l=3, m_s=1/2$
 - $n=3, l=3, m_l=3, m_s=1/2$
11. Menurut model atom Bohr, elektron bergerak mengelilingi inti hanya pada lintasan tertentu. Besarnya momentum anguler pada lintasan itu adalah
- berbanding terbalik dengan tetapan Planck
 - berbanding lurus dengan tetapan Planck
 - berbanding lurus dengan tetapan Rydberg
 - berbanding terbalik dengan tetapan Rydberg
 - berbanding terbalik dengan momentum linier
12. Sebuah batang dengan panjang L_0 dan masa diam m_0 , bergerak dengan laju v mendekati kecepatan cahaya, selalu berlaku
1. massa gerak $> m_0$
 2. energi diam $= m_0 c^2$
 3. panjang batang yang dilihat oleh pengamat yang diam lebih kecil dari L_0
 4. energi kinetik $= \frac{1}{2} m_0 v^2$
- Pernyataan yang benar adalah
- 1,2,3
 - 1 dan 3
 - 2 dan 4
 - 4 saja
 - semua benar
13. Bila massa diam sebuah partikel m dan massa itu bergerak dengan kelajuan $0,8c$ maka perbandingan massa diam terhadap massa Bergeraknya adalah
- 4 : 5
 - 3 : 5
 - 5 : 6
 - 5 : 4
 - 5 : 3

14. Dua anak kembar A dan B. Pada ulang tahun yang ke-20,
- (c = kecepatan cahaya). Pada saat B berulang tahun yang ke-24 kembali ikut merayakan ulang tahun tersebut. Menurut pengamatan A, umur mereka adalah
- 28 tahun
 - 26 tahun
 - 24 tahun
 - 22 tahun
 - 20 tahun
15. Suatu batang panjang 1 m. Jika kemudian batang digerakkan searah memanjangnya dengan kecepatan $3/5c$ (c = kecepatan cahaya) maka panjang batang yang diam adalah
- 60 cm
 - 80 cm
 - 90 cm
 - 100 cm
 - 120 cm
16. Suatu ion digerakkan mendekati kecepatan cahaya sehingga massanya bertambah $1/4$ bagiannya. Jika c = kecepatan cahaya, maka kecepatan ion tersebut ialah
- $1/5c$
 - $2/5c$
 - $3/5c$
 - $4/5c$
 - $7/10c$
17. Dari reaksi di bawah ini
- $${}_3\text{Li}^7 + {}_0\text{n}^1 \rightarrow {}_1\text{H}^3 + {}_2\text{He}^4 + \text{X}$$
- X adalah
- alfa
 - beta
 - gamma
 - netron
 - proton
18. Reaksi berantai adalah
- penggabungan proton dan netron untuk membentuk inti atom
 - bergabungnya inti ringan untuk membentuk inti berat
 - pembelahan inti berat menjadi dua inti lebih ringan
 - pembelahan inti berat terus-menerus yang dipengaruhi oleh netron-netron yang dipancarkan oleh pembelahan inti berat lainnya
 - pembakaran uranium dalam suatu tungku khusus yang disebut reaktor atom

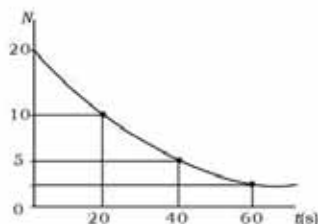
19. Berikut ini adalah manfaat radioisotop, **kecuali**
 - a. membunuh sel-sel kanker
 - b. mendeteksi datangnya kiriman minyak yang diangkat melalui saluran pipa
 - c. memotong baja
 - d. mendeteksi retak-retak dalam suatu pipa panjang pada saluran bawah tanah
 - e. menentukan umur fosil manusia purba
20. Sesudah 2 jam, seperdelapan bagian suatu unsur radioaktif masih tersisa, waktu paruh pada unsur tersebut adalah

a. 20 menit	d. 35 menit
b. 25 menit	e. 40 menit
c. 30 menit	

B. Jawablah pertanyaan-pertanyaan di bawah ini dengan singkat dan tepat!

1. Sebuah kumparan yang terdiri dari 50 lilitan, mula-mula berada di dalam medan magnet hingga melingkupi fluks sebesar $3,1 \times 10^{-4}$ Wb. Kumparan digetarkan hingga dalam waktu 0,02 sekon berada di tempat yang mengakibatkan fluks yang dilingkupi menjadi $0,1 \times 10^{-4}$ Wb. Hitung ggl induksi yang terjadi!
2. Jumlah energi yang dipancarkan dalam bentuk radiasi per sekon oleh benda hitam 16 kali energi yang dipancarkan benda hitam tersebut sebelumnya pada suhu 2000K. Hitung suhu benda hitam sekarang!
3. Jari-jari orbit elektron pada lintasan dasar $5,3 \times 10^{-11}$ m, maka hitunglah jari-jari orbit elektron pada lintasan ke-10!
4. Energi elektron atom hidrogen E . Hitung energi maksimum foton yang dipancarkan atom hidrogen berdasarkan deret Balmer!
5. Hitunglah energi total suatu partikel yang massa diamnya m bila bergerak dengan kelajuan $0,8c$

6. Suatu tempat tertentu di bumi menghasilkan dua kejadian dalam selang 2 detik jika diamati oleh pengamat yang diam di bumi, tetapi jika diamati oleh pengamat yang bergerak terhadap tempat itu, selang waktu tersebut 4 detik. Jika kecepatan pengamatan tersebut besarnya dinyatakan dalam c (kecepatan cahaya) maka hitunglah besar kecepatan tersebut!
7. Setelah 72 hari, iodin-131 yang memiliki waktu paruh 8 hari tinggal massa 10 gram. Hitunglah massa awal unsur tersebut!
8. Massa inti $^{126}\text{Te} = 125,903322$ sma, massa proton = 1,007825 sma, sedangkan massa neutron = 1,008665 sma. Jika 1 sma setara dengan 931 MeV maka hitung energi ikat inti atom itu!
9. Grafik berikut menyatakan hubungan antara jumlah partikel unsur radioaktif (N) dengan waktu peluruhan (t)
Hitung tetapan peluruhan unsur radioaktif tersebut!



10. Massa inti $^4_2\text{He} = 4,002603$ sma. Massa $^2_1\text{H} = 2,014102$ sma jika 1 sma = 931 MeV maka hitung energi minimum yang diperlukan untuk memecah partikel alfa menjadi 2 neutron!

Glosarium

Deret. Susunan (dalam bentuk garis) yang teratur.

Dielektrik. Isolator elektrik.

Difraksi. Pengagihan (distribusi kembali) di ruang intensitas gelombang sebagai akibat kehadiran objek atau benda yang menyebabkan variasi baik di amplitudo gelombang maupun fasenya.

Ekipotensial. Potensial sama.

Elektroskop. Alat pendeteksi adanya jenis muatan listrik.

Emisivitas. Daya memancarkan.

Fisi. Pembelahan inti atom (menjadi atom baru lebih ringan).

Fusi. Penggabungan dua inti atom ringan membentuk inti atom lebih berat dengan melepas sedikit energi ikatnya.

Gelombang longitudinal. Gelombang yang bergetar searah dengan arah rambatannya.

Gelombang transversal. Gelombang yang bergetar tegak lurus dengan arah rambatannya.

Impedansi. Total hambatan yang terjadi pada rangkaian arus bolak-balik.

Induksi. Proses pembangkitan tenaga listrik (elektrik) di dalam sirkulasi tertutup oleh arus (gerak) magnetik melalui gerak putar.

Intensitas. Daya setiap satuan luas.

Interferometer. Alat untuk mendeteksi pola interferensi.

Interferometer. Alat yang digunakan untuk mengukur perubahan indeks bias udara (cahaya).

Kadar. Nilai, harga, taraf, tingkatan.

Kapasitor. Piranti elektrik (2 penghantar) disekap dengan dielektrik.

Kontraksi. Pengurutan, penegangan.

Medan. Ruang yang mengandung pengaruh gaya.

Orbital. Bagian ruang dengan peluang tinggi untuk menjumpai elektron tertentu dalam sebuah atom.

Osilator. Alat/piranti yang menghasilkan asilasi listrik.

Radiasi. Pancaran.

Reaktansi. Perlawanan terhadap arus bolak-balik.

Reduksi. Pengurangan, pemotongan.

Resonansi. Peristiwa ikut bergetarnya suatu benda karena getaran benda lain.

Rotor. Bagian generator yang berputar, terdiri dari kumparan.

Spektrum. Rentetan warna kontinu yang diperoleh apabila cahaya diuraikan ke dalam komponennya.

Stator. Bagian generator yang tetap, terdiri dari magnet yang kuat.

Transformasi. Perubahan rupa (bentuk, sifat, fungsi, dan sebagainya).

Vibrator. Perkakas/alat yang dapat menghasilkan getaran.

Daftar Pustaka

- Achelis, Elisabeth, et-all. 2000. *IPP Edisi 4*. Jakarta: Grolier International, IMV: PT Widya Dara.
- Epstein, Lewis Carroll. 1987. *Thingking Physics*. San Francisco: Insight Press
- _____; 2005. *Physics, Prepare for Exams Series (topical)* Singapura: Red Spot
- Giancoli, Duglas C. 1997. *Fisika Jilid 1*. Jakarta: Erlangga.
- _____. 2001. *Fisika, Jilid 2*. Jakarta: Erlangga
- Halliday, David; Robert Resnick, Jearl Walker. 2004. New York: Replika Press.
- Jati, B. M. E. 2003. *Fisika Dasar 1*. Yogyakarta: FMIPA UGM
- Kristen Lippincott. 2001. *Jendela Iptek 14: Astronomi*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Mary dan John Gribbin. 2001. *Jendela Iptek 13: Ruang dan Waktu*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Peter Lafferty. 2001. *Jendela Iptek 3: Gaya dan Gerak*. Jakarta: Balai Pustaka.
- Roger Bridgman. 2001. *Jendela Iptek 15: Teknologi*. Jakrata: Balai Pustaka.
- Serway, Raymond A. 1996. *Physics for Scientist and Engineers, Fourt Ed*. United States : Saunders College Publishing.
- Wilson, Jerri D dan Anthony J. Buffa. 1997. *College Physics*. US: Prentice Hall

Indeks

A

aberasi kromatik 100
absorpsi 73
airy disk 126
akselerator 334
amplitudo gelombang 6
angka gelombang 10
anjang gelombang 3
arah medan gravitasi 176
aris-garis gaya listrik 156
Arthur H Compton 293
arus Eddy 246
atenuasi 365
atom 300
atom hidrogen 305

B

bayangan 89
beda potensial 174, 243
beda potensial listrik 192
berkas cahaya 74
bilangan kuantum magnetik 313
bilangan kuantum orbital 312
bilangan kuantum spin 313
bilangan kuantum utama 310
bunyi 33

C

cahaya monokromatik 119
cepat rambat gelombang 25
cermin 83
cermin bola 86
cermin cekung 88, 89
cermin datar 84
Charles A. De Coulomb 142
crown 100

D

David Brewster 129
defek massa 358
demokritus 300
diagram fasor 260
diamagnetik 231
dielektrik 188
difraksi 113, 121, 122, 124, 126
dilatasi waktu 326
dipol listrik 180
dosis energi 367

E

efek compton 294
efek fotolistrik 290, 344
elektron 146
elektron valensi 143
elektroskop 144
energi elektron 303
energi gelombang bunyi 46
energi ikat inti 356
energi listrik 256, 269
energi potensial 181
energi potensial gravitasi 193
energi potensial listrik 173

F

faktor daya 267
faraday 241
fenomena gelombang 113
feromagnetik 233
fluks magnet 224, 241
fluks magnetik 270
fluks medan listrik 166
frekuensi ambang, 291
frekuensi mode 20
frekuensi sudut 12
frinji 116, 123

G

garis medan 165
gaya coulomb 303
gaya konservatif 174
gaya listrik 166
gaya magnet 205, 209, 210
gelas flint 100
gelombang audio 34
gelombang bunyi 34
gelombang cahaya 118, 128
gelombang harmonik 5
gelombang infrasonik 34
gelombang longitudinal 4
gelombang mekanik 2
gelombang sinusoidal 17
gelombang transversal 4
gelombang ultrasonik 34
generator 245

H

hipotesa Planck 289
hukum Ampere 220, 221
hukum Ampere-Maxwell 247
hukum Bragg 127
hukum Coulomb 153, 152
hukum Gauss 247
hukum III Newton 141
hukum Kirchhoff 261
hukum Snellius 130
hukum Snellius 77
Huygen 324, 120

I

impedansi 266
indek bias 76, 118
induksi magnet 204
induksi timbal balik 254
induktansi 261
Induktansi diri 248
induktor 253, 261
intensitas 44
interface 74

interferensi 58, 113, 120
interferensi gelombang cahaya 118
interferensi konstruktif 119, 123

J

J.J Thompson 206, 300
John Dalton 300

K

kapasitas kapasitor 188
kapasitor 184
kapasitor bola 187
kapasitor keping sejajar 186
kapasitor silinder 186
kecepatan bunyi 38
kecepatan rambat gelombang 5
kecepatan relatif 319
kesetimbangan elektrostatik 162
kisi 127, 128
konduktor 172, 183
konduktor bola 183
konstanta Ryberg 303
konstanta Stefan-Boltzman 286
kontraksi panjang 330

L

lensa 94
lensa bikonkaf 94
lensa konvergen 94
Louis de Broglie 330

M

Marie Curie 348
Max Planck 288
medan listrik 153, 157, 159, 186, 206
medan magnet 202, 203, 207, 215, 210, 243
medan magnet pada loop 209
medan vektor 203
medium 74
mikroskop 99
momen magnetik 228
muatan listrik 140, 202
muka gelombang 73

N

neutron 140
Niels Bohr 303

O

optik geometri 72

P

panjang gelombang 3, 116, 286
paramagnetik 232
peluruhan alfa 340
peluruhan beta 351
peluruhan gamma 352
peluruhan radioaktif 344
pemantulan 82
pembiasan 82
percobaan Melde 24
percobaan Michelson-Morley 325
pergeseran Wien 28
periode osilasi muatan 259
pipa organa 54
polarisasi 128
polarisasi bidang 128
polarisasi cahaya 132
polarisasi sebagian 129
polarisasi secara penuh 129
potensial listrik 178
potensial penghenti 291
Prinsip Pauli 316
proton 140

R

R.A Millikan 301
radiasi termal 284
rangkaian RL 250
rapat muatan permukaan 162

reaksi fisi 361
reaksi fusi 362
reaksi inti 359
reaktansi 260
reaktansi induktif 262
relativitas khusus 283
Rutherford 301

S

selenoida 253
sinar ekstraordiner 131
sinar polarisasi 131
sinar-X 366
solenoida 223
sudut bias 78
sudut kritis 82
sudut polarisasi 129
sumber gelombang 72
sumbu optik 87
superposisi gelombang 14

T

taraf intensitas bunyi 48
teleskop 99
Thomas Young 114
toroida 222
transformator 270

U

Unsur radioaktif 348

W

waktu paruh 354

Lampiran

Konstanta - konstanta Dasar

Besaran	Simbol	Nilai Pendekatan	Nilai Terbaik yang Terakhir
Laju cahaya di ruang hampa	c	$3,00 \times 10^8$ m/s	$2,99792458 \times 10^8$ m/s
Konstanta Gravitasi	G	$6,67 \times 10^{-11}$ N.m ² /kg ²	$6,67259(85) \times 10^{-11}$ N.m ² /kg ²
Bilangan Avogadro	N_A	$6,02 \times 10^{23}$ mol ⁻¹	$6,0221367(36) \times 10^{23}$ mol ⁻¹
Konstanta gas	R	$8,315$ J/mol.K = $1,99$ kal/mol.K = $0,082$ atm.liter/mol.K	$8,314510(70)$ J/mol.K
Konstanta Boltzmann	k	$1,38 \times 10^{-23}$ J/K	$1,380658(12) \times 10^{-23}$ J/K
Muatan elektron	e	$1,60 \times 10^{-19}$ C	$1,6021733(49) \times 10^{-19}$ C
Konstanta Stefan-Boltzmann	σ	$5,67 \times 10^{-8}$ W/m ² .K ⁴	$5,67051(19) \times 10^{-8}$ W/m ² .K ⁴
Permittivitas hampa udara	$\epsilon_0 = (1/c^2)10^9$	$8,85 \times 10^{-12}$ C ² /N.m ²	$8,854187817... \times 10^{-12}$ C ² /N.m ²
Permeabilitas hampa udara	μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ T.m/A	$1,2566370614... \times 10^{-6}$ T.m/A
Konstanta Planck	h	$6,63 \times 10^{-34}$ J.s	$6,6260755(40) \times 10^{-34}$ J.s
Massa diam elektron	m_e	$9,11 \times 10^{-31}$ kg = $0,000549$ u = $0,511$ MeV/c ²	$9,1093897(54) \times 10^{-31}$ kg = $5,48579903(13) \times 10^{-4}$ sma = $1,6726231(10) \times 10^{-27}$ kg
Massa diam proton	m_p	$1,6726 \times 10^{-27}$ kg = $1,00728$ u = $938,3$ MeV/c ²	$1,007276479(12)$ sma = $1,6749286(10) \times 10^{-27}$ kg
Massa diam neutron	m_n	$1,6749 \times 10^{-27}$ kg = $1,008665$ u = $939,6$ MeV/c ²	$1,008664904(14)$ sma = $1,6605402(10) \times 10^{-27}$ kg
Satuan massa atom (1sma)		$1,6605 \times 10^{-27}$ kg = $931,5$ MeV/c ²	$931,49432(28)$ MeV/c ²

Ditinjau oleh B.N. Taylor, National Institute of Standards and Technology.

Angka-angka dalam kurung menandakan simpangan baku ketakpastian eksperimen pada digit-digit akhir: Nilai tanpa kurung adalah nilai eksak. (Yaitu, besaran yang terdefinisi)

Triple Points

Material	Suhu (K)	Tekanan (10 ⁵ Pa)
Hidrogen	13.84	0.0704
Deuterium	18.63	0.171
Neon	24.57	0.432
Oksigen	54.36	0.00152
Nitrogen	63.18	0.125
Ammoniak	195.40	0.0607
Sulfur dioksida	197.68	0.00167
Karbon dioksida	216.55	5.17
Air	273.16	0.00610

Disadur dari Young, Hugh D., University Physics, 7th Ed. Table 16-3
HyperPhysics

Konversi Satuan (Ekivalen)

Panjang

$1 \text{ in.} = 2,54 \text{ cm}$
 $1 \text{ cm} = 0,394 \text{ in.}$
 $1 \text{ ft} = 30,5 \text{ cm}$
 $1 \text{ m} = 39,37 \text{ in.} = 3,28 \text{ ft}$
 $1 \text{ mil} = 5280 \text{ ft} = 1,61 \text{ km}$
 $1 \text{ km} = 0,621 \text{ mil}$
 $1 \text{ mil laut (U.S.)} = 1,15 \text{ mil} = 6076 \text{ ft} = 1,852 \text{ km}$
 $1 \text{ fermi} = 1 \text{ fermometer (fm)} = 10^{-15} \text{ m}$
 $1 \text{ angstrom } (\text{\AA}) = 10^{-10} \text{ m}$
 $1 \text{ tahun cahaya (ly)} = 9,46 \times 10^{15} \text{ m}$
 $1 \text{ parsec} = 3,26 \text{ ly} = 3,09 \times 10^{16} \text{ m}$

Volume

$1 \text{ liter (L)} = 1000 \text{ mL} = 1000 \text{ cm}^3 = 1,0 \times 10^{-3} \text{ m}^3$
 $= 1,057 \text{ quart (U.S.)} = 54,6 \text{ in}^3$
 $1 \text{ gallon (U.S.)} = 4 \text{ qt (U.S.)} = 231 \text{ in}^3 = 3,78 \text{ L}$
 $1 \text{ m}^3 = 35,31 \text{ ft}^3$

Laju

$1 \text{ mil/h} = 1,47 \text{ ft/s} = 1,609 \text{ km/h} = 0,447 \text{ m/s}$
 $1 \text{ km/h} = 0,278 \text{ m/s} = 0,621 \text{ mil/h}$
 $1 \text{ ft/s} = 0,305 \text{ m/s} = 0,682 \text{ mil/h}$
 $1 \text{ m/s} = 3,28 \text{ ft/s} = 3,60 \text{ km/h}$
 $1 \text{ knot} = 1,151 \text{ mil/h} = 0,5144 \text{ m/s}$

Sudut

$1 \text{ radian (rad)} = 57,30^\circ = 57^\circ 18'$
 $1^\circ = 0,01745 \text{ rad}$
 $1 \text{ rev/min (rpm)} = 0,1047 \text{ rad/s}$

Waktu

$1 \text{ hari} = 8,64 \times 10^4 \text{ s}$
 $1 \text{ tahun} = 3,156 \times 10^7 \text{ s}$

Massa

$1 \text{ satuan massa atom (u)} = 1,6605 \times 10^{-27} \text{ kg}$
 $1 \text{ kg} = 0,0685 \text{ slug}$
 $(1 \text{ kg mempunyai berat } 2,20 \text{ lb dimana } g = 9,81 \text{ m/s}^2.)$

Gaya

$1 \text{ lb} = 4,45 \text{ N}$
 $1 \text{ N} = 10^5 \text{ dyne} = 0,225 \text{ lb}$

Energi dan Kerja

$1 \text{ J} = 10^7 \text{ ergs} = 0,738 \text{ ft.lb}$
 $1 \text{ ft.lb} = 1,36 \text{ J} = 1,29 \times 10^3 \text{ Btu} = 3,24 \times 10^{-4} \text{ kkal}$
 $\text{kkal} = 4,18 \times 10^3 \text{ J} = 3,97 \text{ Btu}$
 $1 \text{ eV} = 1,602 \times 10^{-19} \text{ J}$
 $1 \text{ kWh} = 3,60 \times 10^6 \text{ J} = 860 \text{ kkal}$

Daya

$1 \text{ W} = 1 \text{ J/s} = 0,738 \text{ ft.lb/s} = 3,42 \text{ Btu/h}$
 $1 \text{ hp} = 550 \text{ ft.lb/s} = 746 \text{ W}$

Tekanan

$1 \text{ atm} = 1,013 \text{ bar} = 1,013 \times 10^5 \text{ N/m}^2$
 $= 14,7 \text{ lb/in.}^2 = 760 \text{ torr}$
 $1 \text{ lb/in.}^2 = 6,90 \times 10^3 \text{ N/m}^2$
 $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2 = 1,45 \times 10^{-4} \text{ lb/in.}^2$

KUNCI AKTIF BELAJAR FISIKA XI SMA/MA

Bab 1. Gelombang

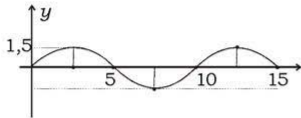
A. Pilihan Ganda

1. b 3. a 5. a 7. a 9. b

B. Esai

1. a. $\lambda = 10 \text{ m}$
 $f = 0,12 \text{ Hz}$

b.



3. a. $0,02 \text{ m/s}$
 b. $y = (0,04 \text{ m}) \sin (3,14 \text{ m}^{-1} (x - (0,02 \text{ ms}^{-1})t))$
 c. $v_y = 0,02512 \text{ m/s} (x = 0)$
 $a_y = 0,02512 \text{ m/s}^2 (x = 10)$
 5. a. $f_v = 10^{14} \text{ Hz}$
 $f_m = 4,2 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$
 b. $\lambda_R = 1 \text{ m} - 200 \text{ m}$
 c. $f_R = (6 \cdot 10^{16} - 3 \cdot 10^{21}) \text{ Hz}$
 7. $v = 2,5 \text{ m/s}$
 $f = 10 \text{ Hz}$
 $\lambda = 0,25 \text{ m}$
 9. a. $v = 200 \text{ m/s}$
 $\lambda = 0,6 \text{ m}$

$$f = \frac{2000}{6} \text{ Hz}$$

b. $f_{\text{nada dasar}} = \frac{1000}{9} \text{ Hz}$

Bab 2. Gelombang Bunyi

A. Pilihan Ganda

1. e 3. c 5. a 7. c 9. d

B. Esai

1. a. $f_0 : f_1 : f_2 : f_3 : \dots = 1 : 2 : 3 : 4 : \dots$
 \dots
 b. terjadi resonansi bila ada benda lain yang bergetar dekat dengan benda tersebut

pada frekuensi yang sama dengan frekuensi yang dialami benda tersebut.

3. 2 frekuensi yang lain adalah 150 Hz dan 450 Hz

5. a. $\lambda = \frac{340}{4,5} \cdot 10^{-6} \text{ m}$

b. $\lambda = 0,33 \cdot 10^{-3} \text{ m}$

7. $\lambda_B = \frac{340}{300} \text{ m}$

$$\lambda_T = \frac{34}{3} \text{ m}$$

9. $f_{\text{gadis}} = 500 \text{ Hz}$
 $f_{\text{paman}} = 485,3 \text{ Hz}$

Bab 3. Optik Geometri

A. Pilihan Ganda

1. b 3. d 5. b 7. b 9. b

B. Esai

2. 6 kali
 3. 5 dioptri

Bab 5. Listrik Statis

A. Pilihan Ganda

1. c 3. d 5. e 7. e

B. Esai

1. $3,2 \cdot 10^{-16} \text{ joule}$

Bab 6. Medan Magnet

A. Pilihan Ganda

1. b 3. d 5. a 7. a

B. Esai

1. $B = \frac{\mu_0 I}{3\pi a}$

3. $\frac{21}{10}$

Bab 10. Relativitas Khusus

A. Pilihan Ganda

1. c 3. e 5. b 7. c 9. a

B. Esai

1. a. $v = 0,64c$
b. $v = 0,7c$
2. $\Delta t = 6 \times 10^{-6} \text{ s}$
5. $l = 0,8 l_0$

Soal Semester I

2. a 4. c 8. b 9. d
11. c 13. b 14. d 15. d
16. d 17. b 18. b 19. d
20. e

Esai

2. 10 m/s
4. $\frac{4}{9} I_0$
5. 800 Hz
6. 80 N
8. 45 volt
9. $6 \cdot 10^{-3} \text{ coulomb}$
10. $7,5 \times 10^{-2} \text{ ke atas}$

Soal Semester II

1. b 2. b 3. d 4. a
5. e 6. a 7. a 8. d
9. b 10. b 11. b 12. a
13. b 14. a 15. b 16. c
17. d 18. d 19. c 20. e

Esai

1. 0,75 V
2. 10.000 K
3. 53 A
4. $\frac{1}{4} E$
5. $\frac{4}{5} mc^2$
6. $\frac{5}{13} c$
7. 720 gram
8. 1066 MeV
9. 0,0355/s
10. 24 MeV

Aktif Belajar
Fisika
Untuk SMA & MA Kelas XII

ISBN 978-979-068-798-1 (No. Jld lengkap)
ISBN 978-979-068-801-8

Buku ini telah dinilai oleh Badan Standar Nasional Pendidikan (BSNP) dan telah dinyatakan layak sebagai buku teks pelajaran berdasarkan Peraturan Menteri Pendidikan Nasional Republik Indonesia Nomor: 9 Tahun 2009 Tanggal 12 Februari 2009 tentang Penetapan Buku Teks Pelajaran yang Memenuhi Syarat Kelayakan untuk Digunakan dalam Proses Pembelajaran.

Harga Eceran Tertinggi (HET) Rp.20.073,-